

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

Л.Д. Писаренко

“ ” 201\_\_ р

**Магістерська дисертація**

з спеціальності : 171- Електроніка

Спеціалізація: Електронні прилади та пристрої

На тему: Покращення характеристик безпроводного 4G-роутера

**Виконав:**

Студент 6 курсу, групи ДЕ-71мп **Гончаров Б. М.**

**Керівник роботи:**

Професор, д.т.н.

**Мельник І. В.**

**Консультанти:**

**Нормоконтроль:**

Доцент, к.т.н.

**Чадюк В. О.**

**Рецензент:**

**Заграничний А. В.**

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ 2018

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
						1
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Факультет \_\_\_\_\_ Е л е к т р о н і к и  
Кафедра \_\_\_\_\_ Електронні прилади та пристрої  
Напрямок підготовки 6.050802 - Електронні пристрої та системи  
Програма професійного спрямування - Електронні прилади та пристрої

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.  
\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

на магістерську дисертацію

**Гончарову Богдану Миколайовичу**

**1. Тема роботи: Покращення характеристик безпроводного 4G-роутеру**

Керівник роботи **Мельник Ігор Віталійович**, професор, д.т.н.  
затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р. № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання:** студентом роботи 18.12.2018 р.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:** Реферат, Система умовних позначень, вступ, огляд варіантів модуляції, підсилювачі сигналів, стандарти безпроводного зв'язку, висновки до першого розділу, структурна схема системи, система параметрів, розрахунок підсилювача, розрахунок параметрів системи, розрахунок швидкості передачі, електрична принципова схема підсилювача, друкована плата, висновки.

**5. Перелік графічного матеріалу:** Структурна схема системи, система параметрів, електрична принципова схема підсилювача, друкована плата підсилювача.

**6. Перелік наукових публікацій:** в процесі подання

**7. Дата видачі завдання: 9.09.2018**

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по інтерфейсам передачі даних	09.09.2018	
2	Розробка схем функціональної (структурної, електричної принципової)	17.09.2018	
3	Розробка схеми електричної принципової	10.10.2018	
4	Розробка конструкторської документації на пристрій	18.10.2018	
5	Технологія виготовлення основного модуля пристрою або друкованої плати	19.11.2018	
7	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді	11.12.2018	

Студент гр. ДЕ-71мп  
Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Гончаров Б.М.  
Мельник І.В.

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

на тему: Покращення характеристик безпроводного 4G-роутеру

Київ 2018

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РЕФЕРАТ

**Покращення характеристик безпроводного 4G-роутеру** / Дипломна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «Спеціаліст» напряму підготовки 6.050802 – Електронні пристрої та системи. **Гончаров Богдан Миколайович**. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-71мп. – К.: НТУУ «КПІ ім. Сікорського», 2018.

**Ключові слова:** 4G, LTE, CDMA, IEEE, підсилювачі, пропускна здатність каналу, швидкість передачі інформації

**Короткий зміст роботи:** В ході виконання дипломної роботи було проведено дослідження сучасного ринку безпроводних модемів. Ціллю дослідження було виявити можливість підвищення швидкості передачі інформації. Для розрахунку було обрано метод модуляції, тип підсилювача, кодування було спроектовано структурну схему системи, виходячи з системи параметрів. Було обрано та спроектовано схему підсилювача та побудовано його друковану плату. Було проведено розрахунок підсилювача і розрахунок параметрів системи, а також розрахунок швидкості передачі інформації до і після підсилення. Пристрій має відповідати наступним параметрам:

- Швидкість передачі: більша за 80 МБіт/с;
- Розрядність системи: 8 біт;
- Частотний діапазон: 2,2 ГГц;
- Максимальне підсилення потужності: 25 дБ

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# Зміст

<b>РЕФЕРАТ.....</b>	<b>6</b>
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1 .....	11
ОГЛЯД ВАРІАНТІВ .....	11
1. МОДУЛЯЦІЯ СИГНАЛУ .....	11
1.1. Модуляція гармонічних коливань: амплітудна, фазова, частотна .....	14
Висновок .....	18
1.2. Імпульсна модуляція .....	19
1.3. OFDM-модуляція.....	23
1.3.1. Переваги OFDM-модуляції.....	23
Висновок .....	23
1.3.2. Модель ідеальної системи з OFDM-модуляцією .....	24
1.3.2.1. Передавач.....	24
1.3.2.2. Приймач.....	25
2. ПІДСИЛЮВАЧІ СИГНАЛУ .....	26
2.1. Застосування підсилювачів .....	26
2.2. Характеристики підсилювачів.....	26
2.3. Принцип роботи підсилювачів .....	27
2.4. Спотворення в підсилювачах .....	29
2.5. Класифікація підсилювачів.....	30
2.6. Принципи побудови багатокаскадних підсилювачів.....	32
2.7. Підсилювачі з безпосереднім зв'язком між каскадами .....	35
2.8. Підсилювачі потужності.....	37
Висновок .....	37
2.9.    Режими роботи транзисторів в вихідних каскадах .....	38
2.10.    Особливості роботи вихідних каскадів підсилювачів на ПТ.....	38
3. СТАНДАРТИ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА .....	39
3.1. Стандарт IEEE 802.11.....	39
3.1.1. Принцип роботи.....	39
3.1.2. Характеристики .....	40
3.1.3. Переваги Wi-Fi.....	41
3.1.4.    Недоліки Wi-Fi .....	41
Висновок .....	42

3.2.	CDMA.....	42
3.2.1.	Використання CDMA .....	42
3.2.2.	Модуляція в CDMA.....	43
3.2.3.	Мультимплексування з кодовим поділом каналів (синхронний CDMA).....	44
3.2.4.	Асинхронний CDMA .....	48
3.2.5.	Переваги асинхронного CDMA .....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2.6.	Характеристики CDMA з розширеним спектром .....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2.7.	Спільний CDMA .....	Ошибка! Закладка не определена.
3.2.8.	CDMA в Україні .....	49
	ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1 .....	51
	РОЗДІЛ 2 .....	52
2.1.	СТРУКТУРА СИСТЕМИ.....	52
2.2.	ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	56
2.2.1.	СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ .....	56
2.2.2.	ПІДВИЩЕННЯ ШВИКОСТІ ПЕРЕДІЧІ ІНФОРМАЦІЇ .....	56
	РОЗДІЛ 3 .....	58
3.1.	ВИБІР СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА.....	58
3.2.	Розрахунок підсилювача .....	60
3.2.2.	Аналіз АЧХ підсилювача .....	61
3.3.	Обчислення швидкості передачі з урахуванням підсилення сигналу.....	62
	ВИСНОВКИ .....	63



# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика

ФЧХ - фазочастотна характеристика

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ІКМ – імпульсно-кодова модуляція

Wi-Fi (від англ. Wireless Fidelity) — Бездротова точність

3/4G – третє/четверте покоління

ШПФ - Швидке перетворення Фур'є

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Останнім часом, у зв'язку із значним зростанням популярності портативних комп'ютерів, а також у зв'язку з активним розвитком тенденції до відмови від кабельного інтернету безпроводні модеми отримують більшу популярність з кожним роком.

Зараз на українському ринку запропоновано достатньо широкий асортимент безпроводних модемів, і одними з самих популярних є модеми від операторів мобільного зв'язку, в яких використовується стандарт зв'язку 3G та 4G. В таких модемах частіше за все використовується USB-підключення версії 2.0. Однак якість такої продукції є далеко не найращою, не зважаючи на широкий асортимент модемів — швидкість передачі інформації не перевищує приблизно 90 Мбіт/сек, а стабільність роботи залишає бажати кращого. В квітні 2018 року в нашій країні офіційно з'явився стандарт зв'язку 4G, який пропонує значно більшу швидкість прийому та передачі інформації, але поки що вітчизняний ринок 4G – модемів практично відсутній.

Метою досліджень в даній дипломній роботі є визначення параметрів такого безпроводного модему, який задовольняє технічному завданню, а також є реальним для втілення, і розрахунок параметрів оптимального безпроводного модему у відповідності до технічного завдання. Об'єктом проектування після етапу огляду, класифікації та аналізу буде безпроводний модем з урахуванням розрахунків, виконаних на етапі дослідження. Метою дипломної роботи є розробка модема з характеристиками, кращими за ті, що запропоновані на ринку безпроводних модемів в Україні.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД ВАРІАНТІВ

### 1. МОДУЛЯЦІЯ СИГНАЛУ

В технологіях мереж є тенденція до передачі дискретних та аналогових даних по одній мережі. Комп'ютери та інші прилади обчислювальної техніки виступають в ролі джерел для дискретних даних, в той час як прилади по типу телефонів, камер відеозапису, звукозаписуюча, звуко- та відеовідтворюючі пристрої є джерелами аналогових даних. На ранніх етапах розвитку технології передачі даних в мережі всі дані передавалися виключно в аналоговому вигляді, а дані з дискретної форми перетворювалися в аналогову форму за допомогою таких пристроїв, як модеми.

З часом та з розвитком технології мереж та передачі даних стало зрозуміло, що передача інформації виключно в аналоговій формі не зможе поіпшити якість переданих даних в такому вигляді, в тому випадку, якщо при передачі трапилося істотне спотворення переданої інформації. Сигнал в аналоговій формі сам по собі не надає інформації ні про сам факт спотворення, ні про можливі шляхи виправлення помилки по тій причині що сигнал може бути різної форми, наприклад і такою, яка поступила на приймач, в той час як підвищенн якості передавальних ліній, особливо на великих територіях неможливе без великих фінансових та трудових затрат. Саме по цій причині аналогові прилади для трасферу за запису звукових сигналів стали замінятися на цифрові прилади, яки використовують дискретну модуляцію вихідних аналогових сигналів, що є неперервними у часі.

Методи дискретної модуляції сигналів базується на дискретизації аналогових сигналів за часом та амплітудою. Далі буде розглянуто основні принципи такої модуляції, за приклад буде взято імпульсно-кодову модуляцію, ІКМ (Pulse Amplitude Modulation, PAM), яка дуже часто використовується саме в цифровій телефонії.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

В неперервній у часі функції амплітуда завжди вимірюється з визначеним періодом, і завдяки цьому дискретизується за часом (*diskretization on time*). Після цього кожне зняття показів надається як двійкове число визначеної розрядності, і відбувається дискретизація за значенням функції – дискретна множина значень амплітуди заміняє собою неперервну множину значень. Прилад, який функціонує як такий перетворювач, називається аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Сигнали після такого перетворення передаються як проста послідовність нулів та одиниць в межах каналів зв'язку. Методи кодування застосовуються ті ж самі, що і при передачі вихідної інформації в дискретному вигляді. На приймачі лінії закодована інформація перетворюється на біти, сформовані в визначеній послідовності, а прилад, який називається цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), демодулює амплітуди в цифровому вигляді і визначає, якою була вхідна функція.



Рисунок 1.1 – Амплітудна модуляція неперервного сигналу

Дискретна модуляція базується на теорії Найквіста – Котельникова. Як стверджує ця теорія, аналогова функція, що передається як послідовність значень (дискретних в часі), може бути з високою точністю визначена в тому випадку, якщо частота дискретизації в 2 або більше разів перевищує частоту найвищої гармоніки зі спектру функції на виході. При недотриманні цієї умови функція на виході буде сильно відрізнятися від функції на вході. Цифровий запис, трансфер та відтворення інформації мають значну перевагу – можна контролювати вірогідність прочинаних з носія інформації або зчитаних з лінії даних. Для таких цілей використовуються такі самі методи, що і для цифрових

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

даних в комп'ютерах, а саме розрахунок контрольної суми, використання самокоректованих кодів та повторна передача спотворених кадрів. Щоб передача голосових повідомлень була якісною, в ІКМ використовують частоту квантування амплітуди коливань звукових сигналів 8000 Гц, тому що в телефонії для передачі голосу був обраний діапазон від 300 до 3400 Гц, який на високому рівні передає всі гармоніки голосу розмовляючих людей. За теоремою Найквіста-Котельникова для передачі голосового сигналу високої якості потрібно проводити передачу на частоті, що в 2 рази чи більше перевищує саму високу гармоніку аналогового сигналу, а саме 6800 Гц, в той час як 8000 Гц робить деякий запас, забезпечуючи якість сигналу. При імпульсно-кодовій модуляції зазвичай використовують код на 7 або 8 біт щоб подати амплітуду одного імпульсу. Відповідно на виході маємо 127 або 256 градацій звуку, що задовольняє доволі якісній передачі голосу співрозмовників. При імпульсно-кодовій модуляції передача 1 голосового каналу потребує пропускну здатність каналу 56 або 64 Кбіт/с. Це залежить від того, скількома бітами ми подаємо кожне з вимірювань. У випадку використання 7 біт на частоті передачі 8 КГц одержуємо

$8000 \cdot 7 = 56 \text{ Кбіт/с}$ , а для випадку 8 біт отримуємо  $8000 \cdot 8 = 64 \text{ Кбіт/с}$ .

Сигнал 64 Кбіт/с також називається елементарним каналом цифрових телефонних мереж. Для передачі неперервного сигналу в дискретній формі необхідно жорстке дотримання мережами інтервалу в часі 125 мікросекунд, що відповідає частоті дискретизації 8 кГц між двома послідовними імпульсами (необхідна синхронна передача інформації від одного вузла мережі до іншого). Якщо синхронність прийому імпульсів не дотримується, сигнал на вході некоректно відновлюється і це призводить до спотворення повідомлень. Похибка синхронізації в 10 мілісекунд частіше за все призводить до накладання слів, а похибка в 200 мілісекунд може призвести до втрати розпізнавання слів, але втрата одного імпульсу майже не помічається завдяки згладжувальним приладам в ЦАП, які базуються на інерційності сигналу, адже амплітуда звукового сигналу не може змінитися на велике значення миттєво. На чистоту

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

повідомлень, що проходять ЦАП має вплив як синхронність надходження сигналів на вхід, так і похибка дискретизації амплітуд цих сигналів. В теоремі Найквіста – Котельникова вказано, що амплітуди сигналу виміряні з високою точністю, але використання для їх збереження двійковий код з обмеженням по розрядності може спотворити амплітуди цих сигналів, тому по відповідності виникає спотворення і відновленого сигналу, яке називають шумом дискретизації.

### 1.1. Модуляція гармонічних коливань (АМ, ЧМ, ФМ)

Аналогова модуляція має широке застосування для передавання інформації по каналах, які працюють з вузькою смугою частот, наприклад, з каналом, що надається абонентам телефонної мережі для загального користування. Такий канал називають каналом тональної частоти. Типова АЧХ такого каналу представлена на рис. 1.1.1. Канал тональної частоти пропускає по своїй смузі частоти діапазону 300...3400 Гц. Як бачимо, смуга пропускання такого каналу є рівною 3,1 кГц. Не дивлячись на те, що голос людини володіє ширшим спектром, що дорівнює діапазону 100 Гц...10 кГц, для задовільної якості передачі голосу діапазон в 3,1 кГц є цілком достатнім. Жорсткі межі смуг пропускання визвані тим, що необхідно використовувати прилади для звуження та з'єднання каналів в телефонії. Електронний прилад, який модулює сигнал на передавачі та деодулює сигнал на приймачі, називають модемом (модулятор-демодулятор).

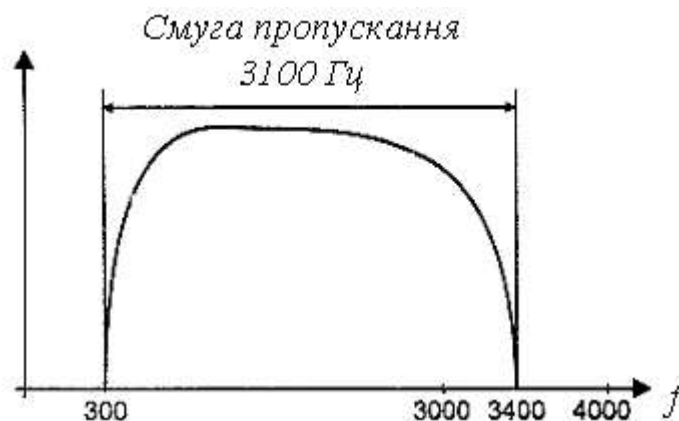


Рис. 1.1.1 – АЧХ каналу тональної частоти

Модуляція аналоговим методом – це такий метод кодування, в якому дані кодуються зміною фази, частоти або амплітуди синусоїди основної частоти (несучої). На рис. 1.1.2. показані основні методи АМ:

1.1.2, а) – потенційний код, який постійно використовують для передачі інформації між різними блоками комп'ютерної системи. Являє собою набір бітів інформації, отриманої на виході, що подається високорівневими потенціалами для логічної «1» і потенціалами нульового рівня для логічного «0».

1.1.2, б) – в цьому способі при АМ для логічної «1» обирається один рівень амплітуди синусоїдального сигналу, а для логічного «0» – інший, але він не так часто використовується по причині невисокого рівня стійкості до завад, але в комбінації з фазовою модуляцією його використовують досить часто.

(рис. 1.1.2, в) – частотна модуляція, в якій нуль та одиниця інформації на виході передаються синусоїдальними сигналами з частотами  $f_0$  і  $f_1$ , що відрізняються. Така модуляція не має потреби в складанні складної схематики модемів и має широке використання у модемах, розрахованих на низьку швидкість передачі інформації (300 біт/с або 1,2 кБіт/с).

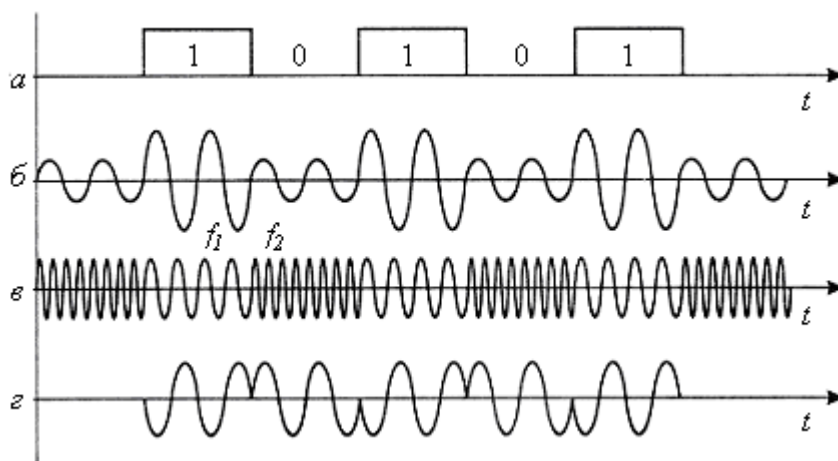


Рисунок 1.1.2 – Різні види модуляції

(рис. 1.1.2, г) – фазова модуляція, в якій значенням даних нуль та один є відповідні значення сигналів частоти, що співпадають за значенням, але відрізняються за фазою. В модемах, що працюють на високій швидкості, майже

завжди методи модуляції поєднуються і частіше за все це фазова модуляція та амплітуда.

Якщо порівнювати різні методи модуляції та спектри їх сигналів, то спектр сигналу, який промодулювали, виявляє залежність від виду модуляції та її швидкості.

В якості прикладу розглядається спектр синусоїди, вид кодування – потенційний. Припустимо, що логічна «1» буде кодуватися додатним потенціалом, а логічний «0» кодується від’ємним потенціалом, але з тою ж величиною. В цілях спрощення обчислень будемо припускати, що дані, які передаються, складені з нескінченної послідовності чередованих 1 та 0.

В потенційному методі кодування такий спектр впливає з теореми Фур’є для функції, що є періодичною. В тому випадку, якщо дані дискретизації передавались з швидкістю  $N$  біт/с, спектр сигналу буде складатися зі складової постійної частоти (нульової) та нескінченної множини гармонік з вказаними частотами  $f_0, 3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$ , де  $f_0 = N/2$ . Амплітуди вказаних гармонік зменшуються, але з досить невеликою швидкістю – з коеф.  $1/3, 1/5, 1/7, \dots$  від амплітуди  $f_0$ . В результаті спектр потенційного коду потребує досить широку смугу пропускання для якісної передачі. Додатково необхідно пам’ятати про те, що на практиці спектр не постійний, а весь час змінюється залежно від того, як саме інформація передається по лінії передачі. Для прикладу розглянемо передачу достатньо довгої послідовності логічних одиниць та нулів, яка зрушує спектр в сторону низьких частот, а якщо в ланцюгу інформації присутні тільки одиниці або тільки нулі, весь спектр цілком складений з гармоніки нульової частоти. Під час передавання чергуючихся 1 та 0 відсутня постійна складова спектру сигналу. З цієї причини спектр сигналу, що отримується в результаті, вкладається в смугу частот, починаючи зі значення, близького до 0 Герц і закінчуючи приблизно на  $7f_0$ . Через незначний внесок в вихідний сигнал гармоніками з частотами, вищими за  $7f_0$  зазвичай нехнують.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



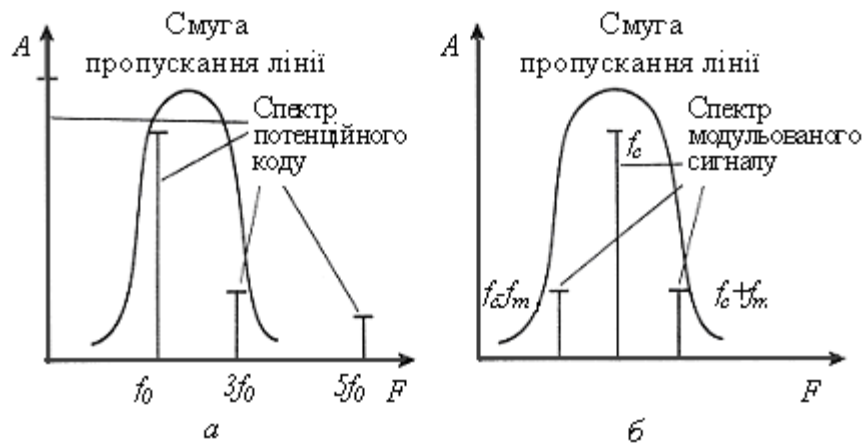


Рисунок 1.1.3 – Амплітуда модуляції неперервного процесу

Верхній рубіж в потенційному кодуванні сигналу, якщо маємо канал тональної частоти, зазвичай досягається при швидкості передачі інформації в 971 біт/с, а нижній, що є неробочим для всіх швидкостей передачі, бере початок приблизно з 300 Гц. Саме тому на каналах тональної частоти взагалі ніколи не використовуються потенційні коди.

Спектр при АМ складено з синусоїдального сигналу з несучою частотою  $f_c$  та двох гармонік  $f_c + f_m$  та  $f_c - f_m$ , що називаються бічними.  $f_m$  – частота, з якою змінюється інформаційний параметр синусоїдального сигналу. Цей параметр співпадає з параметром швидкості передачі інформації при використанні двох рівнів амплітуди (рис. 1.1.3, б). Частота  $f_m$  визначає, якою буде пропускна здатність лінії передачі, якщо обрати такий спосіб кодування даних. При невисокій частоті модуляції ширина спектру синусоїди теж буде невеликою і буде дорівнювати  $2f_m$ . З цієї причини сигнали не будуть спотворюватися лінією передачі в тому випадку, якщо смуга пропускання лінії передачі  $\geq f_m$ . Цей метод модуляції може бути використаний в каналі тональної частоти лише за умови, що інформація передається зі швидкістю, яка не перевищує  $\frac{3100}{2} = 1550 \frac{\text{біт}}{\text{с}}$ .

У випадку, якщо для передавання інформації використано чотири однакові за значенням амплітуди, пропускна здатність такого каналу зростає до 3100 біт/с.

При ФМ та ЧМ спектр сигналу ускладнюється порівняно з АМ з тієї причини, що в цьому випадку з'явиться більше 2 бічних гармонік, але їх

розташовано симетрично відносно основної несучої частоти, а амплітуди цих бічних гармонік спадають з великою швидкістю. Саме з цієї причини дані методи модуляції доцільно використовувати для передачі інформації по каналах тональної частоти.

Для більш швидкої передачі інформації широко використовуються методи модуляції, основані на комбінації різних методів. Найроповсюдженіший з методів – метод квадратурної амплітудної модуляції (QAM). В його основі лежить об'єднання ФМ з вісьмома значеннями параметрів зрушення фази і АМ з чотирма рівнями амплітуди. Проте із  $4 \cdot 8 = 32$  комбінацій сигналу не всі з них мають використання. В кодах Треліса для подачі вихідної інформації допускається використання 6/7/8 різних комбінацій, в той час як інші комбінації з 32 можливих не розглядаються як дозволені. Така надмірність кодування обумовлена потребою в виявленні модемом сигналів з помилками, які є наслідком спотворень по причині наявності завад в каналах передачі даних. Ці канали комутують довготривалими за часом та з великою амплітудою.

### Висновок до розділу 1.1

Комбіновані та складніші методи модуляції доцільніше використовувати в системах передачі інформації, ніж звичайні методи модуляції, адже це дозволяє працювати з вищими частотами, збільшує завадозахищеність та надійність, також на виході ми отримуємо менше спотворень сигналу та він максимально наближений до вхідного.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2. Імпульсна модуляція

В ІМ послідовність прямокутних (зазвичай) імпульсів використовують в якості носія модульованих В системах, що працюють без дротів, такі послідовності прямокутних імпульсів заповнено коливаннями на високих частотах, таким чином створюється подвійна модуляція. Зазвичай такі методи модуляції використовують при передачі дискретизованої інформації.

Види ІМ розрізняють залежно від вигляду параметра, що модулюється:

1. Амплітудно-імпульсна модуляція (АІМ), змінний параметр - амплітуда. (рис. 1.2.1)
2. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ),  $\tau_2$  - змінний.
3. Фазово-імпульсна модуляція (ФІМ),  $\tau_1$  - змінний, а саме змінюється положення імпульсу на інтервалі  $T$ .
4. Частотно-імпульсна модуляція (ЧІМ),  $f = 1/T$  - змінний параметр.

Якщо імпульси прямокутні, частіше всього використовується АІМ та ШІМ.

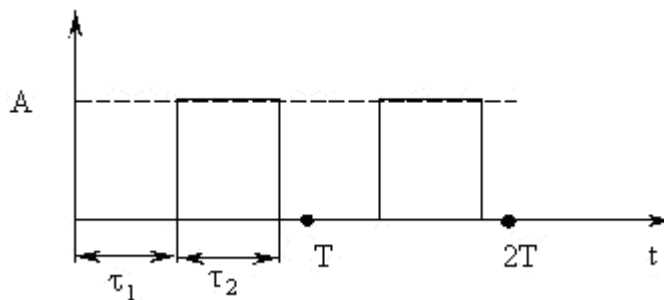


Рисунок 1.2.1 – Класифікація імпульсної модуляції

Також ІМ класифікують залежно від характеру зв'язку між сигналом, що модулює та параметром, який модулюється на модуляцію І та ІІ роду (рис. 1.2.2).

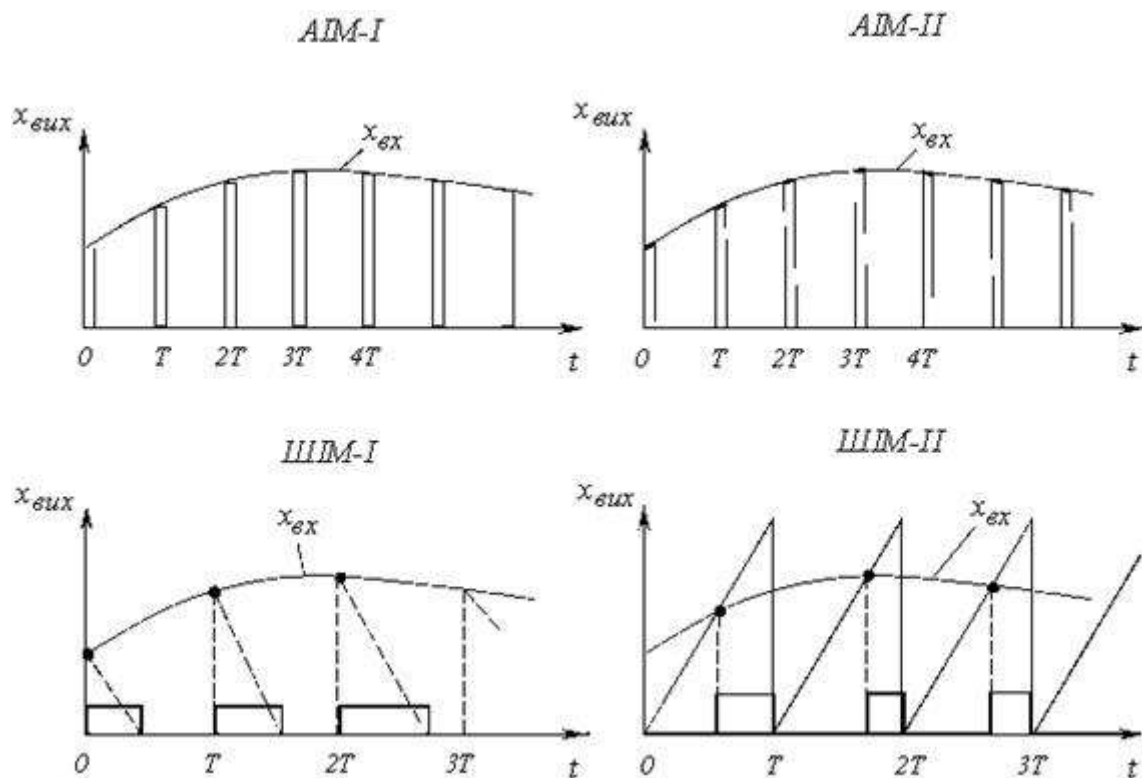


Рисунок 1.2.2 – Класифікація ІМ за зв'язком між сигналом та модульованим параметром

Модуляція першого роду, наприклад АІМ-I та ШІМ-I, проявляється у випадку, якщо модульований параметр визначається по значенню сигналу на вході в зафіксовані, тактові моменти в часі значенням вхідного сигналу. Модуляція другого роду, наприклад АІМ-II та ШІМ-II, проявляється у випадку, якщо значення модульованого параметра на виході визначаються параметром вхідного сигналу або в результаті рішення трансцендентних рівнянь. Інакше кажучи, модуляція першого роду відбувається тоді, коли параметр на виході під час життя імпульсу незмінний, а другого роду – коли цей параметр змінюється разом з поточним значенням сигналу на вході. Залежність параметра, що модулюється, від значень вхідного параметра називають модуляційною характеристикою. Вона буває як лінійною, так і нелінійною, на відміну від широтно- та частотно-імпульсної, які, виходячи зі своїх властивостей, бувають виключно нелінійними. Для широтно-імпульсної модуляції мінімальна тривалість імпульсу дорівнює 0, а максимальна – визначеному періоду  $T$ .

Модуляційна характеристика може виглядати так, як вказано нижче на рис. 1.2.3.



Рисунок 1.2.3 – Модуляційна характеристика

Вище було вказано, що АІМ полягає в постійному змінненні зростання амплітуди імпульсів в пропорції до функції модулюючого сигналу, якщо тривалість імпульсу та період існування імпульсу незмінні.  
 $U(t) = U_0 + ks(t), \quad i = const, \quad T = const.$

При апроксимації за Фур'є:

$$f(t) = U_0 + U_n \cos(n\omega t).$$

Підставляючи значення  $f(t)$  в вираз для визначення  $u(t)$ , отримаємо:

$$u(t) = (1 + M \cos(\omega t))U_0 + U_n \cos(n\omega t)(1 + M \cos(\omega t)),$$

В нескінченному спектрі знаходяться бічні складові відповідно до вхідної функції, а якщо сигнал багатотональний, складові замінюються бічними смугами цих спектрів, а якщо будемо мати додаткове заповнення імпульсів на високих частотах, весь спектр зміститься в область ВЧ на ту ж саму частоту заповнення спектру імпульсами. Модуляція по тривалості (ширині) імпульсів, так звана широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) базується на управлінні тривалістю імпульсів за пропорцією до функції вхідного сигналу за умови незмінних періода та амплітуди імпульсів.

$$t = t_0 + ks(t), \quad U = const, \quad T = const.$$

Наприклад, можна розібрати роботу ШІМ за допомогою прикладу гармонічного коливання. При дискретизуванні кривої важливий не тільки інтервал дискретизації, а і скільки є рівнів квантування. Під час передачі інформації прямокутні імпульси проявляються під час дискретних відліків інформації, а час життя імпульсів встановлюється за пропорцією до значення

відліків, при всьому цьому піковий час життя імпульсів не може бути більшим, ніж інтервал дискретизації інформації.

Варто відмітити, що ШІМ з послідовним визначенням константи дуже ефективно використовують, щоб відстежувати середній рівень сигналу та щоб самостійно і автоматично керувати динамічним діапазоном цього сигналу. Наприклад, це широко використовується в електронних системах керування рівнем звуку інтенсивності освітлення або керування яскравості, а саме в моніторах та телевізорах.

Спектр сигналу в цьому методі модуляції на початку має константу середнього рівня та максимальну частоту гармоніки, яка зашифрована в цьому сигналі. При виділенні вказаних вище складових зі спектру сигнал на виході встановлюється з похибкою квантування, а якщо число рівнів квантування дуже невелике, похибка сигналу на виході дуже сильно зростає.

ІМ за часом - це відхилення імпульсів по осі часу, керуючись модулюючим сигналом і така модуляція дуже схожа на кутову модуляцію гармонічної несучої. Модуляція, при якій в точках, де відбувається модуляція керуючого сигналу та кодування квантових значень, зазвичай, в двійковій системі, називається кодово-імпульсною.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3. OFDM-модуляція

OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) – це такий метод модуляції, що базується за роботи завдяки багатьом ортогональним несучим, які знаходяться на дуже малій відстані одна від одної. Кожна з цих несучих по черзі промодульована більш простим методом модулювання сигналу, і це відбувається на малій символній швидкості для того, щоб не спотворювати загальну швидкість передачі інформації, по аналогії з більш простими методами модулювання одної такої піднесучої і тій самій смузі частот, що пропускається. В роботі промодульовані OFDM сигнали на виході отримують шляхом растосування ШПФ (Швидке перетворення Фур'є).

#### 1.3.1. Переваги OFDM-модуляції

Головним плюсом OFDM при прирівнюванні цього методу до методів з використанням однієї несучої є можливість боротися з завадами в каналі зв'язку. Для прикладу, можна виправляти загасання в області високих частот в мідних провідниках великої довжини, згасаннями на вибіркових частотах, які визвані складним характером поширення та вузькосмуговими перешкодами. Все це можливе без доповнення схеми складними фільтрами-еквалайзерами. При цьому спрощується канална еквалізація завдяки тому, що OFDM може розглядатися як нескінченна кількість повільно модульованих сигналів на вузьких смугах, а не як один модульований на високій швидкості широкосмуговий сигнал. Низька символна швидкість робить доступною опцією використання захисного міжсимвольного інтервалу, що дозволяє боротися з тимчасовим розсіюванням і нівелювати міжсимвольну інтерференцію.

#### Висновок до розділу 1.3.1

Для використання у безпроводному модемі на частотах 4G (2,2 ГГц) доцільніше використовувати OFDM-модуляцію, адже цей тип модуляції бореться з загасанням в області високих частот.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3.2. Модель ідеальної системи з OFDM-модуляцією

#### 1.3.2.1. Передавач

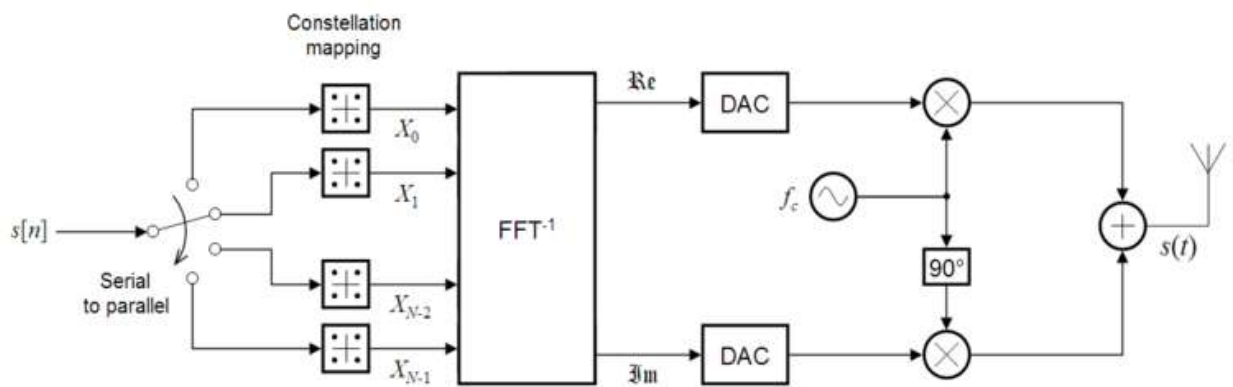


Рисунок 1.3.2.1.1 — Передавач ідеальної системи з OFDM-модуляцією

Промодульований OFDM сигнал являє собою визначену кількість ортогональних несучих, і на кожній несучій передається інформація та незалежно одна від одної модулюються одним з простих видів модуляції. Після цього отриманим сумарним сигналом модулюється вся частота.

$s[n]$  - це послідовний потік двійкових цифр. Перед зворотнім швидким перетворенням Фур'є (FFT) цей потік перетворюється спочатку в деяку кількість паралельних потоків з цифр та після вони окремо модулюються за допомогою процедури фазового (BPSK, QPSK, 8-PSK) або амплітудно-фазової квадратурної модуляції (QAM). При використанні модуляції BPSK виходить потік двійкових чисел (1 і -1), при QPSK, 8-PSK, QAM - потік комплексних чисел. Так як потоки незалежні, то спосіб модуляції і, отже, число біт/символ в кожному з цих потоків може відрізнятися та мати різну бітову швидкість. Якщо пропускна здатність лінії дорівнює 2400 символів в секунду, і перший потік працює з QPSK (2 біта на символ) і передає 4800 біт / с, а інший працює з QAM-16 (4 біта на символ) і передає 9600 біт/с.

Зворотне FFT рахується для  $N$  одночасно надходячих символів,

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



створюючи таке ж безліч комплексних відліків в часовій області (time-domain samples). Далі цифро-аналогові перетворювачі (DAC) перетворюють в аналоговий вигляд окремо дійсну і уявну компоненти, після чого вони модулюють, відповідно, радіочастотну косинусоїду і синусоїду. Ці сигнали далі сумуються і дають сигнал, що передається  $s(t)$ .

### 1.3.2.2. Приймач

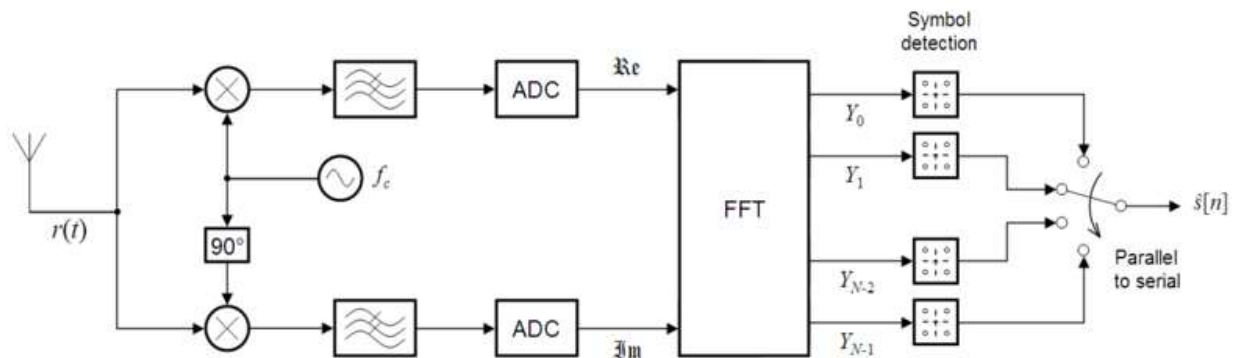


Рисунок 1.3.2.2.1 — Приймач ідеальної системи з OFDM-модуляцією

## 2. ПІДСИЛЮВАЧІ СИГНАЛУ

Підсилювачі є одними з найважливіших елементів безпроводних модемів, адже саме завдяки ним досягається необхідна потужність сигналу, що надходить на вхід системи. Далі буде детальніше розглянуто варіанти використання різних підсилювачів.

### 2.1. Застосування підсилювачів

1. В радіоприймальних і радіопередавальних пристроях, телевізійних установках, вузлах проводового мовлення, апаратури звукопідсилення та звукозапису, радіолокації, багатоканального електрозв'язку, вимірювальної апаратури, електронно-обчислювальних машинах; вони також широко використовуються у всіляких автоматичних і телемеханічних пристроях, без яких не можуть обійтися сучасні заводи, енергосистеми, нафтопромисли і інші виробництва.

2. Підсилювачі застосовуються в апаратурі управління ракетами і літаками, в апаратурі, використовуваної при роботах в галузі атомної фізики, медицини, геології, геофізики і т.д.

### 2.2. Характеристики підсилювачів

Підсилювальні пристрої характеризуються рядом технічних показників. Залежно від того, які з показників вважають основними, формуються вимоги до проектування підсилювачів і вибирають способи їх технічної реалізації. До основних показників підсилювачів відносяться: коефіцієнт посилення, амплітудна і фазочастотна характеристики, коефіцієнт нелінійних спотворень, рівень перешкод, чутливість, стійкість, вхідний і вихідний опір. Обрана в ході проектування і розрахунків схема має задовольняти певному поєднанню згаданих показників.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними характеристиками підсилювачів є АХ та АЧХ, які наведені на рис. 2.2.1 та рис. 2.2.2 відповідно.

АХ - це залежність вихідної напруги від вхідної  $U_{вих}=f(U)$ . На рис. 2.2.1 позначено:

*аб* — робоча ділянка, на якій пропорційним змінам вхідного сигналу відповідають пропорційні зміни вихідного;

*бв* — режим насичення (тут із ростом вхідного сигналу ріст вихідного припиняється – підсилювач виходить із лінійного режиму).

$(U_{вих\ max}, U_{вих\ min})$  – робочий діапазон вхідної напруги. Нелінійність характеристики при вхідних напругах, що менші за  $U_{вих\ min}$  пояснюється наявністю шумових сигналів.

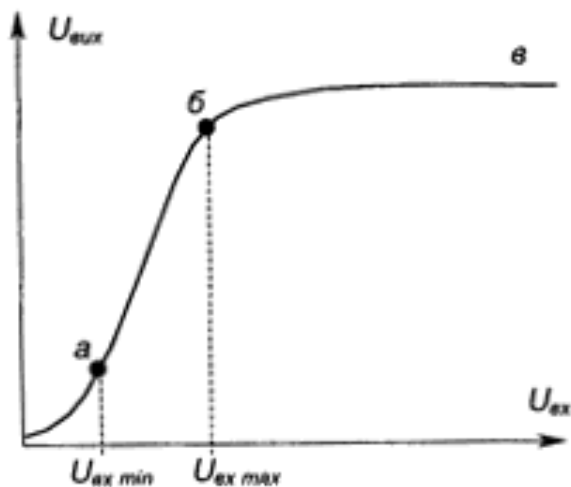


Рис. 2.2.1. Амплітудна характеристика підсилювача

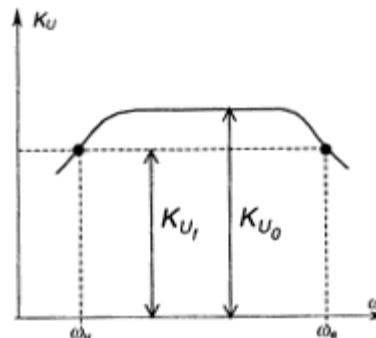


Рис. 2.2.2 – Амплітудно-частотна характеристика  $K_U=f(\omega)$  підсилювача

Амплітудно–частотна характеристика (АЧХ) – це залежність коефіцієнта підсилення  $K_U$  від кругової частоти  $\omega$  (частота сигналу, що підсилюється).

### 2.3. Принцип роботи підсилювачів

Електричні коливання посилюються за допомогою спеціальних приладів - підсилюючих елементів. Ці елементи отримують електричну енергію від

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

джерела живлення і перетворюють її в енергію, що підсилює сигнали,.

Узагальнену структурну схему підсилювального пристрою можна представити таким чином:

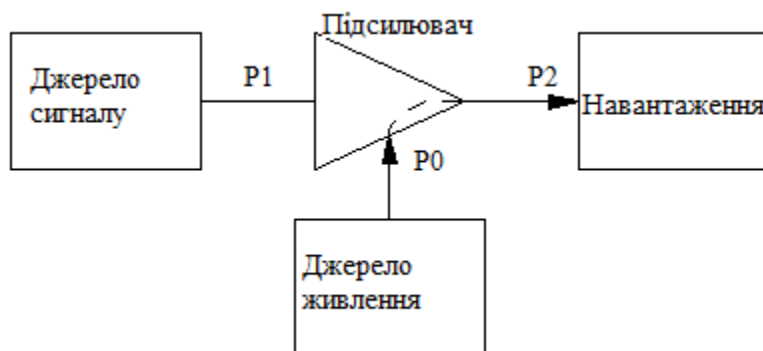


Рис. 2.3.1. Структурна схема підсилювача

Керуюче джерело енергії, від якого посилюються сигнали, що поступають на підсилювач, називається джерелом сигналу, а вхід підсилювача, куди надходять сигнали, - вхідним ланцюгом або входом підсилювача. Прилад, який ці посилені сигнали споживає, називається навантаженням, а вихід, до якого підключають це навантаження, - вихідним ланцюгом або виходом підсилювача. Джерело керованої енергії, що перетворюється підсилювачем в енергію підсилювання сигналів, називають джерелом живлення підсилювача. Також підсилювач в деяких випадках може мати додаткові джерела живлення. В цих джерелах енергія іде не на саме посилення сигналів, а на виведення елементів схеми, що відповідають за підсилення, в робочий стан. Це можуть бути джерела живлення ланцюгів напруги електронних ламп, джерело напруги зсуву та інші прилади.

Елементи, що мають здатність посилювати, називають підсилювальними елементами (ПЕ). До їх числа відносяться електронна лампа, транзистор, деякі види інтегральних мікросхем (ІМС), дросель насичення (в магнітному підсилювачі), варикап або варіконд (в ємнісному підсилювачі) та інші.

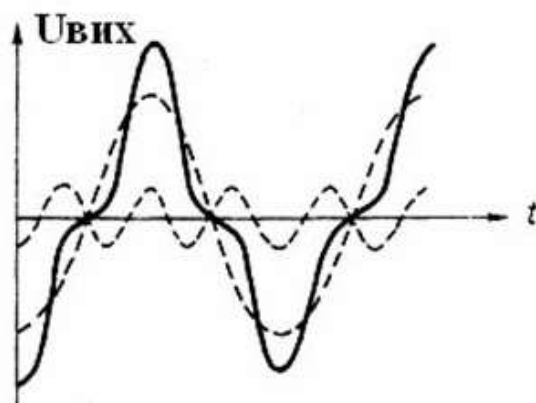
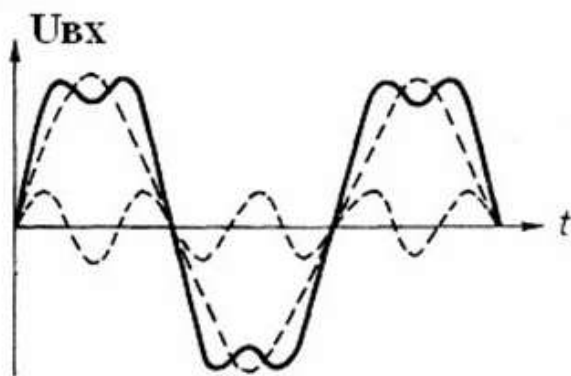
В деяких випадках підсилення завдяки одному підсилюючому елементу схеми на практиці недостатньо. В цих ситуаціях в підсилювачі використовують

кілька підсилюючих ланцюгівщо включені так, що підсилені сигнали першим елементом надходять на другий, потім на третій і так далі. Один елемент підсилення в таких схемах та всі супутні до нього елементи називаються підсилювальним каскадом. Майже всі сучасні підсилювачі є багатокаскадними, щоб забезпечити достатнє підсилення.

## 2.4. Спотворення в підсилювачах

В процесі посилення підсилювач дещо змінює форму сигналу. Відмінність форми сигналу на виході від форми на вході називається спотворенням. Наявність в схемі підсилювача реактивних опорів, величина яких залежить від частоти, призводить до зміни форми складного гармонічного сигналу на виході лінійного підсилювача з двох причин: гармонійні складові складного вхідного сигналу посилюються неоднаково, тобто коефіцієнт посилення підсилювача неоднаковий на різних частотах; гармонійні складові складного вхідного сигналу при посиленні зсуваються на різні відрізки часу, тобто фазові зрушення, що вносяться підсилювачем, змінюють взаємне розташування гармонійних складових у вихідному сигналі.

Частотні спотворення - спотворення форми вихідного сигналу, що викликається неоднаковим посиленням різних частот; спотворення форми вихідного сигналу, викликані фазовими зрушеннями, що вносяться підсилювачем, називають фазовими спотвореннями.



## 2.5. Класифікація підсилювачів

Підсилювачі класифікують за різними ознаками: за характером підсилення сигналів, по смузі підсилення частот, за призначенням підсилювача і за родом використовуваних підсилюючих елементів.

За характером підсилення сигналів все підсилювачі можна поділити на дві групи:

**1.** Підсилювачі гармонійних сигналів, призначені для посилення гармонійних і квазігармонійних (майже гармонійних) сигналів різної величини і форми, тобто періодичних сигналів, гармонійні складові яких змінюються набагато повільніше тривалості нестационарних процесів в ланцюгах підсилювача. До таких підсилювачів відносяться: мікрофонні, трансляційні й магнітофонні підсилювачі, підсилювачі відтворення грамзапису, звукового кіно, багато вимірювальні підсилювачі та інші.

**2.** Підсилювачі імпульсних сигналів, призначені для посилення імпульсних періодичних і неперіодичних сигналів різної величини і форми. Нестационарні процеси в ланцюгах таких підсилювачів повинні протікати настільки швидко, щоб форма підсилення імпульсів цими процесами майже не спотворювалася. До імпульсних підсилювачів відносяться підсилювачі імпульсних систем зв'язків, підсилювачі сигналів телевізійного зображення (відеопідсилювачі), імпульсних радіолокаційних пристроїв, електронно-обчислювальних машин, багато підсилюючих систем регулювання і управління та ін.

По ширині смуги (діапазону) і абсолютним значенням підсилення частот підсилювачі поділяються на:

- підсилювачі постійного струму, призначені для посилення електричних коливань в смузі частот від  $f_n$  до вищої робочої точки  $f_v$ ; ці підсилювачі

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилюють як змінні складові сигналу, так і його постійну складову. Такі підсилювачі застосовують в електронних стабілізаторах напруги і струму, в автоматики і телемеханіки, вимірювальної апаратури та інших пристроях.

- підсилювачі змінного струму, які посилюють лише змінні складові сигналу в смузі частот від нижчої робочої частоти  $f_n$  до вищої робочої частоти  $f_v$ ; до цієї групи належить більшість існуючих підсилювачів.

- підсилювачі високої частоти, призначені для посилення електричних коливань модульованої високої частоти, наприклад, радіосигналів, що приймаються приймальною антеною радіоприймача.

- підсилювачі проміжної частоти, що підсилюють електричні сигнали модульованої проміжної (перетвореної) частоти, наприклад, що застосовуються в радіоприймальних пристроях, супергетеродинного типу. Ставлення верхньої частоти спектра  $f_v$  до нижньої частоти  $f_n$  в підсилювачах високої і проміжної частоти зазвичай близько до одиниці; вивчаються ці підсилювачі в курсах радіоприймальних і радіопередавальних пристроїв.

- підсилювачі низької частоти, призначені для посилення неперетворених (первинних) електричних коливань. До підсилювачів низької частоти відносяться підсилювачі звукових частот, які посилюють електричні коливання в смузі частот, що сприймаються людським вухом. Підсилювачі звукової частоти використовують в апаратурі радіомовлення, радіозв'язку, провідного зв'язку, пристроях запису і відтворення звуку та інших приладах. Свою назву підсилювачі низької частоти отримали на початку розвитку підсилювальної техніки, коли частоти первинних сигналів не перевищували кількох кілогерц (мова, музика, телеграфні сигнали), і в порівнянні з радіосигналами дійсно були низькими. В даний час цей термін виявляється невідповідним для багатьох підсилювачів неперетворених сигналів, тому що частота останніх не є низькою. Наприклад, частота сигналів телевізійного зображення досягає  $3 \cdot 10$  МГц, і підсилювачі цих сигналів зазвичай називають відеопідсилювачами.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- широкосмугові підсилювачі, підсилюють дуже широку смугу частот (вища робоча частота порядку мегагерци і вище і нижня робоча частота порядку кілогерцях і нижче) і мають дуже велике відношення вищої робочої частоти і нижньої.

- виборчі, чи селективні, підсилювачі, що підсилюють сигнали в дуже вузькій смузі частот, посилення яких різко падає за межами цієї смуги; їх поділяють на резонансні, частотна характеристика яких має вигляд резонансної кривої, і смугові, посилення яких майже постійно в вузькій смузі частот і різко падає її межами.

Підсилювачі, в яких сигнали посилюються без перетворення їх частоти, називають підсилювачами прямого підсилення; підсилювачі, в яких частота підсилюються сигналів перетворюється, називають підсилювачами з перетворенням.

За призначенням підсилювачі поділяють на: магнітофонні, телевізійні, радіолокаційні, вимірювальні, трансляційні, телекомунікації і т.д.

І, нарешті, в залежності від використовуваних підсилюючих елементів підсилювачі ділять на: транзисторні, лампові, магнітні, діодні, молекулярні і т.д.

## 2.6. Принципи побудови багатокаскадних підсилювачів

У двокаскадних схемах на біполярних транзисторах використовують різноманітні комбінації послідовного включення транзисторів. В тому випадку, коли вихідний опір джерела сигналу і опір навантаження підсилювача майже дорівнюють один одному і дорівнюють приблизно одиницям або десяткам кОм, має сенс застосувати каскади з закальним емітером, а при відносно невеликих опорах, що не перевищують 100 Ом - перший каскад з загальним емітером і другий каскад з загальним колектором, а при відносно великих опорах, що перевищують 100 кОм - перший каскад з загальним колектором і другий з загальним емітером.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



В тому випадку, коли опір навантаження підсилювача сильно перевищує опір самого джерела сигналу, рекомендується застосувати і той і той каскад з загальним емітером. В протилежному випадку слід використати два емітерних каскади або перший каскад з загальним емітером, а другий колекторний.

Ці рекомендації для багатокаскадних систем підсилення стосуються першого каскаду та останнього. Каскади між ними - емітерні.

Гібридні підсилювачі, які включають з польові та біполярні транзистори дають істотну фору підсилювачам з транзисторами якогось одного типу. Наприклад, в підсилювачах, в яких чергуються каскади на різних транзисторах, отримується вищий КП за потужністю, тому що польові транзистори включені з ОІ або ОС, дозволяють отримати значно вищий КП за струмом, а біполярні транзистори - значне посилення напруги за умови навантаження значним опором польового транзистора на вході. Опір таких підсилювачів на вході з легкістю можна підвищити, а на вході – зменшити. Такі підсилювачі бувають односпрямованими, а точніше мати таку властивість: при поданні напруги сигналу на вихід напруга на вході повністю відсутня. Односпрямованість підсилювача допомагає досягти значного посилення напруги при стабільній роботі.

Підсилювачам з вхідними каскадами на польових транзисторах властивий великий вхідний опір. Шість варіантів схем двокаскадних підсилювачів, в яких перший каскад виконаний на ПТ, наведені на рис. 2.6.1. У всіх схемах використовуються ПТ з р-каналом, причому каскади з'єднуються безпосередньо (гальванічно). Можливий також зв'язок через конденсатор. Аналогічні схеми можна скласти, використовуючи транзистори з n-каналом, ізольованим затвором, а також БТ структури n-p-n.

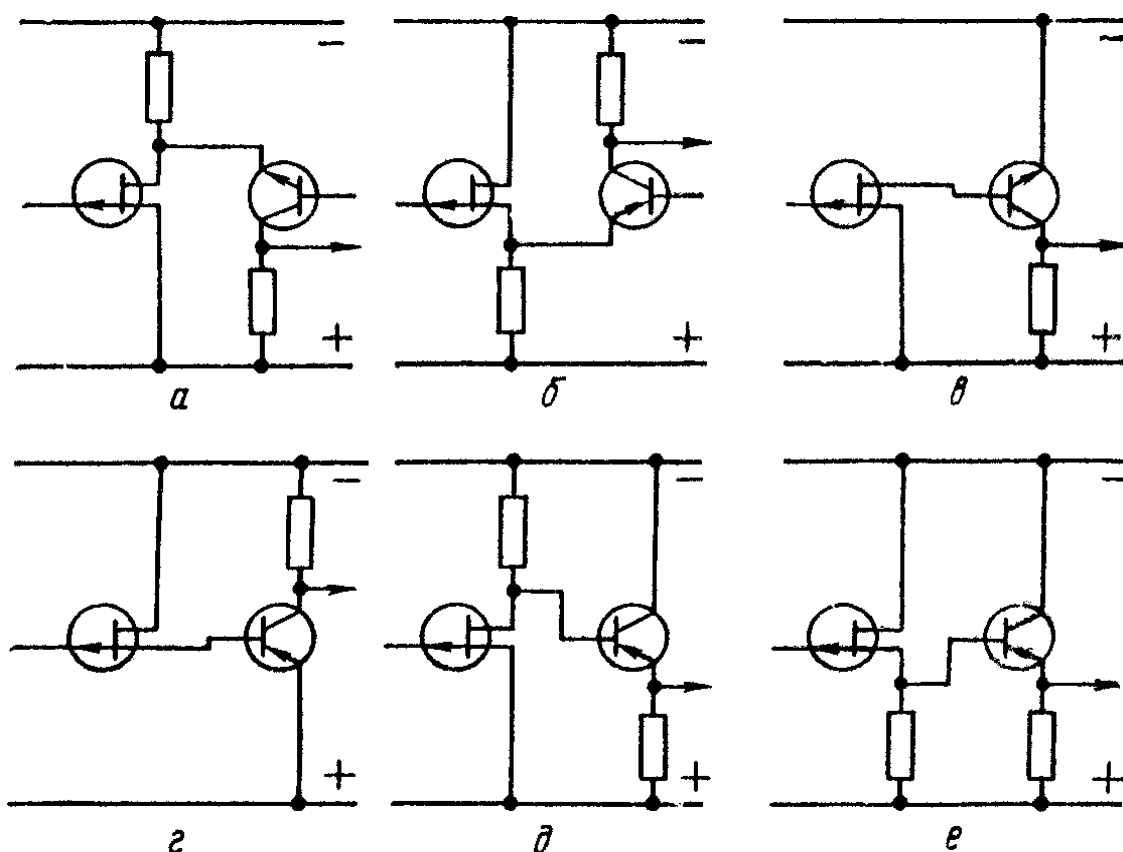


Рисунок 2.6.1. Спрощені схеми двокаскадних гібридних підсилювачів

а) - 3В - 3Б; б) - 3С - 3Б; в) - 3В - 3Е; г) - ОС - ОЕ; д) - 3В - 3К; е) - ОС - ОК

Двокаскадний підсилювач, в якому перший каскад з 3В, другий - з 3Б (3В - 3Б), характеризується високими коефіцієнтом посилення напруги і входним опором, а також хорошою АЧХ. Такий підсилювач є практично односпрямованим, якщо опір навантаження каскаду з 3Б не надто великий. Для отримання великого коефіцієнта посилення напруги опір навантаження повинен бути великим, проте при цьому погіршується АЧХ підсилювача в області вищих частот.

Підсилювач, в якому перший каскад з 3С, другий з 3Б (3С - 3Б), відрізняється меншою входною ємністю і великим входним опором у порівнянні з підсилювачем за схемою 3В - 3Б, проте його коефіцієнт посилення напруги менше. Підсилювач по схемі 3В - 3Е (Рис. 2.6.1, в) має порівняно малий вихідний опір (більше ніж на порядок менше в порівнянні з підсилювачами 3В - 3Б і 3С - 3Б) і значно більший коефіцієнт посилення струму; АЧХ в області

вищих частот дещо гірше. Дуже близький за властивостями до цього підсилювача підсилювач, виконаний за схемою ЗС - ЗЕ. Підсилювач, в якому перший каскад з ЗВ, другий з ЗК (ЗВ - ЗК), має усереднений коефіцієнт посилення за напругою, високий вхідний і дуже низький вихідний опір, саме тому використовується в якості перетворювача опорів. Недоліком цього підсилювача є порівняно велика вхідна ємність. Підсилювач, в якому перший каскад з ЗС, другий з ЗК (ЗС - ЗК), не посилює напругу, може мати найменшу вхідну ємність і найбільший вхідний опір. Використовується в якості перетворювача опорів.

## 2.7. Підсилювачі з безпосереднім зв'язком між каскадами

Підсилювачі з безпосереднім зв'язком між каскадами відмічаються відносною простотою побудови, тому що містять небагато елементів, значними показниками якості, якщо зрівняти з широким діапазоном робочих частот і невеликими нелінійними спотвореннями, стабільністю параметрів системи під час заміни транзисторних елементів, підвищенні або зменшення напруги живлення і температури повітря. Така стабільність параметрів системи досягається за допомогою введення сильного негативного зворотнього зв'язку по постійному струму, що надходить з виходу підсилювача на самий перший каскад або на декілька.

На рис.2.7.1. наведено схеми двокаскадних підсилювачів з безпосереднім зв'язком між каскадами. У схемі, даної на рис.2.7.1 (а) використовуються два ланцюги НОЗ. Напруга на резисторі R6, залежна від струму емітера транзистора VT2, подається в ланцюг бази транзистора VT1. Від струму транзистора VT2 залежить напруга на його колекторі і, отже, напруга на емітер транзистора VT1. У цьому підсилювачі режим роботи встановлюється підбором опору резистора R6 або R2. Оскільки резистор R3 не зашунтовано конденсатором, в підсилювачі діє ООС по

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

змінному струму, що зменшує спотворення. В підсилювачі, схема якого наведена на рис.2.7.1 (б), напруга зворотного зв'язку, залежна від струму транзистора VT2, з резистора R5 подається в ланцюг емітера транзистора VT1. Всередині першого каскаду діє ООС по постійному струму, оскільки в ланцюзі емітера включений резистор. У цьому підсилювачі режим роботи встановлюється підбором опору резистора R1. З такої кількості можливих варіантів застосування таких схем стабілізації роботи транзисторів має сенс використовувати такі, що допомагають досягти задовільної стабільності роботи підсилювача і включають в себе менше елементів. Одним з важливих критеріїв вискоефективної стабілізації роботи є невеликий опір резисторів, що підключені в безтранзисторному ланцюзі. При підвищенні резистивності в ланцюзі бази сильно підвищується дестабілізуючий вплив зворотного струму колектора.

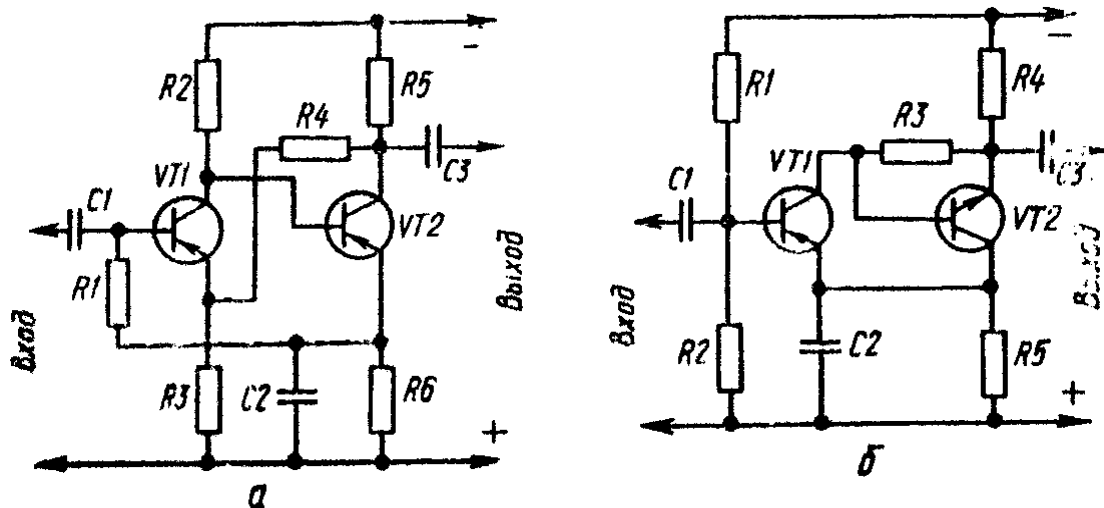


Рисунок 2.7.1. Схеми двокаскадних підсилювачів з безпосереднім зв'язком на БТ з однаковою (а) та різною (б) структурою

## 2.8. Підсилювачі потужності

Каскад слід вважати потужним, якщо транзистори в ньому віддають в навантаження потужність, що наближена до найвищої. Серед вимог до потужних каскадів на виході є основні – отримання потрібної потужності в навантаженні та ККД близький до максимального при спотворенні сигналу, що є допустимим. Потреба в найвищому ККД дуже важлива для підсилювачів з підживленням за допомогою автономних джерел. Максимальне посилення потужності вже є другорядною вимогою, тому що все необхідне підсилення сигналу може бути отримане в інших каскадах.

Чим вище ККД каскаду, тим менш потужний транзистор потрібен для отримання необхідної потужності. Максимальний ККД досягається при оптимальному навантаженні. Однак опір навантаження, як правило, буває задано. Якщо воно значно відрізняється від оптимального, то для отримання високого ККД навантаження включають через узгоджувальний трансформатор. Використання трансформатора на вході потужного вихідного каскаду дозволяє отримати максимальний коефіцієнт посилення потужності передвихідного каскадом і мінімальний рівень спотворень при заданій потужності в навантаженні підсилювача. Застосування узгоджувальних трансформаторів в малогабаритних підсилювачах призводить до зниження ККД, оскільки малогабаритні недорогі трансформатори мають порівняно малий ККД.

### Висновок до розділу 2.8

Для реалізації схеми безпроводного модему доцільно буде використовувати схеми потужних підсилювачів на польових транзисторах, щоб забезпечити значне посилення сигналу на високих частотах 4G.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.9. Режими роботи транзисторів в каскадах на виході

Транзистори можуть працювати в режимах А, В або АВ – так званих класах.

Режим класу А - вихідний струм протікає протягом всього періоду підсилення сигналу.

Режим класу В - з такою відсічкою, при якій вихідний струм протікає практично тільки протягом напівперіоду сигналу. Режим АВ - проміжний, в ньому вихідний струм протікає протягом більш одного напівперіоду сигналу.

Вибір режиму здійснюється подаванням відповідної напруги між базою і емітером. В режимах класів АВ і В можуть працювати тільки двотактні каскади.

## 2.10. Особливості роботи вихідних каскадів підсилювачів на ПТ

Застосування ПТ в вихідному каскаді УЗЧ дозволяє спростити підсилювач, оскільки не потрібно посилення потужності в попередніх каскадах. При використанні потужних МДП-транзисторів змінюється характер нелінійних спотворень (менше вищих гармонік, ніж при використанні БТ), різко знижуються динамічні спотворення, істотно нижчий рівень інтермодуляційних спотворень. Вихідний каскад на потужних МДП-транзисторах не вимагає застосування термостабілізації. При підвищенні температури крутизна характеристики ПТ зменшується, тому їх саморозігрів не відбувається. Крім того, ПТ в вихідному каскаді витримують коротке замикання в ланцюзі навантаження. Однак режим короткого замикання не повинен бути тривалим, оскільки в цьому режимі на ПТ розсіюється значно більша потужність, ніж на БТ. Недоліки вихідних каскадів на ПТ - менший коефіцієнт використання напруги джерела живлення і необхідність застосування більш ефективних

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

тепловідводів, що обумовлено більшою, ніж у БТ, напругою насичення.

### 3. СТАНДАРТИ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА КОДУВАННЯ

Оскільки система, яку буде представлено для розробки, має безпроводний принцип дії, розглянемо стандарти саме безпроводного зв'язку для передачі та отримання інформації.

#### 3.1. Стандарт IEEE 802.11

Wi-Fi (від англ. Wireless Fidelity, — Бездротова точність) загальна назва для стандарту зв'язку IEEE 802.11 для трансферу інформації по безпроводних каналах зв'язку. Устаткування, яке відповідає цьому стандарту, може бути перевірено Wi-Fi Alliance та пройти сертифікацію і отримати дозвіл та право нанесення логотипу Wi-Fi. Протокол IEEE 802.11n є одним з самих поширених. Wireless LAN має сенс встановлювати для організації мережі, в якій розгортка кабелів дуже незручне, фізично неможливе або просто недоцільне з точки зору фінансових витрат. В наші дні можливості Wi-Fi можуть «видавати» швидкість передачі інформації до 100 Мбіт/с, а користувачі мережі мають можливість пересуватися між мобільними точками доступу там, де є Wi-Fi-покриття, застосовуючі мобільні пристрої, наприклад, портативні комп'ютери, консолі, мобільні телефони або ноутбоки та інші прилади, в яких є приймачі/передавачі Wi-Fi та мати доступ до інтернету.

##### 3.1.1. Принцип роботи

Звичайно Wi-Fi має мінімум одну точку досупу.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

Також є можливість роботи одразу двох користувачів в режимі точка-точка (Ad-hoc), при цьому сама точка доступу не використовується напряму, а користувачі під'єднуються за допомогою мережевих адаптерів. Точка надає свій ідентифікатор мережі (SSID) спеціальними пакетами інформації на швидкості 0,1 Мбіт/с кожні 100 мілісекунд. Тому 0,1 Мбіт/с є мінімальною швидкістю передачі інформації для Wi-Fi. Коли є відомим SSID мережі, користувач має можливість з'ясувати, чи є можливість під'єднатися до цієї точки доступу. Якщо в зоні є SSID приймач може вибирати між ними на основі даних про рівень сигналу.. Стандарт Wi-Fi надає користувачу повну свободу вибору параметрів з'єднання.

Однак стандарт не описує всі аспекти встановлення зв'язку та побудови мереж Wi-Fi. З цієї причини виробник програмного та технологічного забезпечення вирішує цю проблему на свій лад, застосовуючи ті підходи, які він вважає самими доцільними та вичерпно вирішуючими задачу. Саме тому є необхідність класифікувати системи такого зв'язку:

За способом об'єднання точок в мережу:

1. Децентралізовані/автономні
2. Централізовані/керовані контролером
3. Керовані без контролера

За способом управління мережами та налаштування:

- Статичне
- Динамічне
- Багатошарове

### 3.1.2. Характеристики

Точки Wi-Fi-зон дозволяють клієнту обрати а також підтримувати з'єднання декількох комп'ютерів одночасно в одну мережу. Відстань передачі даних залежить від потужності передавального приладу, яка в окремих девайсах налаштовується програмно, наявності та характеристики завад та типу антени.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		40



Основою безпроводної мережі є точка доступу (Access Point), що напряду підключається до наземної кабельної мережі та передає сигнали. Класична АР складається із приймача, передавача, внутрішньої програми для підключення до кабелів мережі та софту для налаштування. Навколо налаштованої точки доступу утворюється область в просторі радіусу 50-100 метрів – хот-спот. В її радіусі дії можна вільно користуватися мережею. Щоб під'єднатися до точки доступу й відчути всі переваги бездротової мережі, власнику ноутбуку або мобільного пристрою з адаптером Wi-Fi необхідно просто потрапити в радіус її дії. Усі дії з визначення пристрою та налаштування мережі більшість операційних систем комп'ютерів і мобільних пристроїв виконують автоматично. Якщо користувач одночасно потрапляє у декілька зон Wi-Fi, то підключення здійснюється до точки доступу, що забезпечує найсильніший сигнал.

### 3.1.3. Переваги Wi-Fi

1. Розгортка мережі без прокладання наземних або інших кабелів та ліній, що іноді не є можливим взагалі або потребує серйозних витрат. Місця, де не можна прокласти кабель, наприклад, поза приміщеннями і в будівлях, що мають історичну цінність, можуть вільно обслуговуватися саме такими мережами.
2. Надає доступ до мережі мобільним пристроям, які донепоширені на ринку девайсів та техніки. Гарантія сумісності всього обладнання завдяки маркуванню точки доступу сертифікатом.
3. Випромінювання набагато менше, ніж від стільникових телефонів.
4. Wi-Fi може працювати у всіх країнах завдяки світовим стандартам.

### 3.1.4. Недоліки Wi-Fi

1. Вузький спектр частот та відсутність роумінгу.
2. Обмеження з експлуатації та встановлення обладнання, обов'язкове

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

устаткування та сертифікація обладнання, різні стандарти в різних країнах.

3. Реєстрація є обов'язковою.

4. Самий часто використований метод шифрування WEP можна дуже нескладно зламати через слабку стійкість алгоритму. Не зважаючи на те, що нові пристрої підтримують досконаліший протокол шифрування даних WPA і WPA2, багато старих точок доступу не підтримують його і вимагають заміни.

### **Висновок до розділу 3.1.**

Безпроводний зв'язок Wi-Fi має достатньо високу швидкість, але дуже низку завадозахищеність та захищеність від зовнішнього доступу, а основні переваги маютьесь тільки у порівнянні з проводним зв'язком.

## **3.2. CDMA**

CDMA (англ. Code Division Multiple Access) – це множинний доступ з кодовим розділенням каналу, один з багатьох методів одночастної передачі даних багатьма користувачами через один канал.

Для множинного доступу інформація кодується окремо створеним кодом, що асоціюється з каналом зв'язку та використовуються властивості конструктивної інтерференції спеціальних кодів шифрування для здійснення мультиплексування. Метод поділяється на дві підкатегорії:

- TDMA, де канал ділиться між користувачами за часом, чи
- FDMA, де канал ділиться за частотами

### **3.2.1. Використання CDMA**

Метод CDMA має широке використання комунікаційних системах, таких як:

- GPS;

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- система позиціонування Galileo;
- супутникова система логістики транспорту;
- Стандарт мобільного зв'язку CDMA з передачею даних зі швидкістю 153 Кб/с;
- Стандарти безпроводного зв'язку 3G CDMA Rev.0, Rev.A, Rev.B для швидкісної передачі даних до 14,7 Мб/с.

### 3.2.2. Модуляція в CDMA

CDMA використовує технологію множинного доступу з розширенням спектром. Метод розширеного спектру розподіляє пропускну здатність даних рівномірно по потужності каналу. Розширення коду є псевдовипадковою послідовністю, яка має звужену функцію неоднозначності, на відміну від інших коротких імпульсів. У CDMA локально згенерований код працює на вищій швидкості, ніж дані, які повинні бути передані. Дані для передачі поєднуються за допомогою логічної операції !АБО по бітах та високочастотного коду. Кожен клієнт в системі CDMA використовує окремий код для модуляції сигналу. Вибір кодів, використовуваних для модуляції сигналу є дуже важливим в роботі систем CDMA. Краще виконання відбуватиметься, коли є хороший поділ між сигналом потрібного користувача і сигналами інших користувачів. Поділ сигналів проводиться шляхом кореляції сигналу з локально згенерованим кодом потрібного користувача. Якщо сигнал відповідає коду потрібного користувача в то кореляційна функція буде високою, і система може отримати цей сигнал. Якщо код потрібного користувача не має нічого спільного з сигналом, кореляція повинна бути якомога ближче до нуля, наскільки це можливо (тим самим усуваючи сигнал); це називається кросс-кореляція. Якщо код корелюється з сигналом в будь-який час зсуву, відмінне від нуля, то співвідношення повинно бути якомога ближче до нуля, наскільки це можливо. Це називається автокореляція і використовується для відхилення багатопроменевої інтерференції.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналогія з проблемою множинного доступу кімната (канал), в якому люди хочуть спілкуватися один з одним одночасно. Щоб уникнути плутанини, люди можуть говорити по черзі (з поділом за часом), говорити на різних майданчиках (з частотним поділом каналів), або говорити на різних мовах (з кодовим поділом каналів). CDMA є аналогом останнього прикладу, де люди, що говорять на одній мові, можуть зрозуміти один одного, а інші мови сприймаються як шум і відкидуються. Так само, в радіо-CDMA, кожна група користувачів отримує загальний код. Багато кодів займають один і той же канал, але тільки користувачі, пов'язані з конкретним кодом можуть взаємодіяти.

Загалом, CDMA належить до двох основних категорій: синхронні (ортогональних кодів) і асинхронні (псевдовипадкові коди).

### 3.2.3. Мультимплексування з кодовим поділом каналів (синхронний CDMA)

Метод цифрової модуляції аналогічний тим, які використовуються в простих приймачах. В аналоговому випадку сигнал низької частоти даних накладається на несучу хвилю з високою частотою, і таким чином іде передача даних. По своїй суті це згортка частоти (теорема Вінера-Хінчина) двох сигналів, що приводить до носія з полозою бокових частот. У цифровому випадку синусоїдальна несуча замінюється за функцією Уолша. Вона являє собою бінарні квадратні хвилі, які утворюють повний ортонормальний набір. Сигнал даних також бінарний і час посилення досягається за допомогою простої функції !АЛЕ.

Синхронність CDMA використовує математичні властивості ортогональності між векторами, що представляють рядки даних.

Кожен користувач в синхронному CDMA використовує код, ортогональний до кодів чужих, щоб модулювати їх сигнал. Приклад чотирьох взаємно ортогональних цифрових сигналів показаний на малюнку. Ортогональні коди мають кросс-кореляції, рівні нулю; іншими словами, вони не заважають один одному. У разі стандарту IS-95 для поділу різних користувачів через кодування сигналу використовується 64-бітні коди Уолша. Так як кожен з 64 кодів Уолша є

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок					Encode sender0	Encode sender1
0					code0 = (1, -1), data0 = (1, 0, 1, 1)	code1 = (1, 1), data1 = (0, 0, 1, 1)
					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45

1	$\text{encode0} = 2(1, 0, 1, 1) - (1, 1, 1, 1) = (1, -1, 1, 1)$ $\text{signal0} = \text{encode0} \otimes \text{code0}$	$\text{encode1} = 2(0, 0, 1, 1) - (1, 1, 1, 1) = (-1, -1, 1, 1)$ $\text{signal1} = \text{encode1} \otimes \text{code1}$
2	$= (1, -1, 1, 1) \otimes (1, -1) = (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1)$	$= (-1, -1, 1, 1) \otimes (1, 1) = (-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1)$

Таблиця 3.2.4.1. Етапи кодування CDMA

Оскільки  $\text{signal0}$  і  $\text{signal1}$  передаються одночасно, вони додаються для отримання вихідного сигналу:

$$(1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1) + (-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1) = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$$

Цей необроблений сигнал називається інтерференційна картина. Приймач потім витягує інформаційний сигнал для будь-якого відомого відправника шляхом об'єднання коду відправника з інтерференційною картиною. Наступна таблиця пояснює, як це працює, і показує, що сигнали не заважають один одному:

Крок	Decode sender0	Decode sender1
0	$\text{code0} = (1, -1), \text{signal} = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$	$\text{code1} = (1, 1), \text{signal} = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$
1	$\text{decode0} = \text{pattern.vector0}$	$\text{decode1} = \text{pattern.vector1}$
2	$\text{decode0} = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)) \cdot (1, -1)$	$\text{decode1} = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)) \cdot (1, 1)$
3	$\text{decode0} = ((0 + 2), (2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))$	$\text{decode1} = ((0 - 2), (2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))$
4	$\text{data0} = (2, -2, 2, 2), \text{meaning} (1, 0, 1, 1)$	$\text{data1} = (-2, -2, 2, 2), \text{meaning} (0, 0, 1, 1)$

Таблиця 3.2.4.2. Об'єднання інтерференційної картини та коду відправника

Крім того, після декодування, всі значення більше, ніж 0, інтерпретуються як 1,

а всі значення менше нуля інтерпретуються як 0. Наприклад, після декодування, data0 (2, -2, 2, 2), але приймач інтерпретує це як (1, 0, 1, 1). Значення точності 0 означає, що відправник не передає ніяких даних, як показано в наступному прикладі:

Припустимо, signal0 = (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1), передається самостійно. У наступній таблиці показано декодування в приймачі:

Крок	Decode sender0	Decode sender1
0	code0 = (1, -1), signal = (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1)	code1 = (1, 1), signal = (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1)
1	decode0 = pattern.vector0	decode1 = pattern.vector1
2	decode0 = ((1, -1), (-1, 1), (1, -1), (1, -1)). (1, -1)	decode1 = ((1, -1), (-1, 1), (1, -1), (1, -1)). (1, 1)
3	decode0 = ((1 + 1), (-1 - 1), (1 + 1), (1 + 1))	decode1 = ((1 - 1), (-1 + 1), (1 - 1), (1 - 1))
4	data0 = (2, -2, 2, 2), meaning (1, 0, 1, 1)	data1 = (0, 0, 0, 0), meaning no data

Таблиця 3.2.4.3. Декодування сигналів в приймачі

Коли приймач намагається декодувати сигнал з використанням коду sender1, в

даних будуть нулі, тому взаємна кореляція дорівнює нулю, і ясно, що sender1 не передає будь-яких даних.

### 3.2.4. Асинхронний CDMA

Коли лінк мобільний-база не може бути точно скоординований, зокрема, через рухливості трубок, потрібен інший підхід. Так як математично неможливо створювати підписи послідовностей, які були б одночасно ортогональними для випадкових початкових точок і які б повністю використовували простір коду, в асинхронній CDMA-системі використовуються унікальні "псевдо-випадкові" або «псевдо-шумові" послідовності. ПШ-код є бінарною послідовністю, яка з'являється випадковим чином, але може бути відтворена детермінованим чином за допомогою призначених приймачів. Ці ПШ-коди використовуються для кодування і декодування сигналу користувача в асинхронному CDMA таким же чином, як і ортогональні коди в синхронному CDMA (як показано в наведеному вище прикладі). Ці ПШ-послідовності статистично корельовані, а сума великого числа ПШ-послідовностей призводить до множинної інтерференції доступу (MAI), яка апроксимується гаусовим шумом процесу (дотримуючись центральної граничної теореми в статистиці). Коди Голда доводять, що ПШ підходить для цієї мети, так як існує низька кореляція між кодами. Якщо всі користувачі будуть з тим же самим рівнем потужності, то дисперсія (наприклад, потужність шуму) зросте прямо пропорційно кількості користувачів. Іншими словами, на відміну від синхронного CDMA, сигнали інших користувачів будуть з'являтися у вигляді шуму до потрібного сигналу і злегка накладатись на потрібний сигнал пропорційно кількості користувачів.

Всі форми CDMA використовують розширений спектр посилення процесу, щоб дозволити приймачам частково дискримінувати небажані сигнали. Сигнали, закодовані за допомогою зазначеної послідовності ПШ (код) приймаються, а сигнали з різними кодами (або той же код, але в інший часовий зсув) відображаються у вигляді широкопasmового шуму і зменшуються на коефіцієнт посилення процесу.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Оскільки кожен користувач генерує MAI, контроль рівня сигналу є досить важливим для передавачів CDMA. CDM (синхронний CDMA), TDMA, або FDMA-приймач може теоретично повністю відкинути сильні сигнали, використовуючи різні коди, часові інтервали або частотні канали через ортогональність цих систем. Але це не відноситься до асинхронного CDMA. Відмова від небажаних сигналів лише часткова. Якщо будь-які або всі небажані сигнали, набагато сильніші, ніж необхідний сигнал, вони будуть придушувати його. Це стало загальною вимогою в будь-якій асинхронній системі CDMA, щоб приблизно відповідати різним рівням потужності сигналу, як показано на приймачі. У CDMA стільникового зв'язку, базова станція використовує схему управління потужністю швидко замкнутим контуром, жорстко контролюючи потужність передачі кожного мобільного телефону.

### 3.2.5. CDMA в Україні

В Україні безпроводне CDMA-покриття забезпечують чотири оператори зв'язку:

1. У діапазоні **UMTS/WCDMA 2100 МГц**:

-ТОВ "ТриМоб"

2. у діапазоні **CDMA-2000 800 МГц**:

- "PEOPLEnet"

- "Інтертелеком"

3. У діапазоні **CDMA-2000 450 МГц**:

### 3.2.6. «Vodafone» LTE/4G в Україні

4G (англ. 4th Generation) — стандарт четвертого покоління мобільного радіозв'язку, наступник 3G та 2G. 4G відрізняється швидкістю передачі

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

даних, яка перевищує показники 3G в 200-500 разів, мережі четвертого покоління не використовують канал для передачі голосу, а працюють тільки з цифровими даними, телефонія переходить у формат VoIP, очікується, що в майбутньому це може привести до відмирання класичного комутування каналів зв'язку на користь чистої інтернет-телефонії.

LTE розглядається як еволюція технології UMTS, є стандартом високошвидкісного бездротового зв'язку передачі даних. Формально LTE відноситься операторами мобільного зв'язку та виробниками до стандарту 4G, хоча не належить до нього фактично, оскільки не відповідає, на відміну від LTE-Advanced (3GPP Release 10) або скорочено LTE-A, технічним критеріям мобільного зв'язку 4-го покоління визначеного вимогами «IMT-Advanced» Сектором радіозв'язку Міжнародного телекомунікаційного союзу. Для просування технології на ринках північної Америки торговою асоціацією 4G Americas, яка популяризує технології групи 3GPP, було впроваджено термін «4G LTE». Сама аббревіатура «LTE» є зареєстрованою торговою маркою і знаходиться в розпорядженні Європейського інституту стандартів телекомунікації, як і логотипи «LTE», «LTE-Advanced», «LTE-Advanced Pro».

Запуск перших базових станцій 4G став можливим після того, як Український державний центр радіочастот оголосив, що 30 березня почне видавати компаніям дозвільні документи. Як відомо, мобільні оператори купили частоти 4G в діапазоні 1800 МГц. Загальний обсяг отриманих в ході аукціону на 4G коштів в діапазоні 1800 МГц досяг цифри в 5,434 мільярда гривень. У ході торгів за частоти в діапазоні 1800 МГц компанії переплатили 1,45 млрд понад стартову ціну. За частоти в діапазоні 2400 МГц сумарно держава отримає за ліцензії понад 2,45 млрд гривень. У сумі держава отримала 7,89 мільярда за 4G.

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

З проаналізованих теоретичних відомостей для розрахунку модема з кращими характеристиками можна сформуванати систему параметрів та структуру системи розділу 2, спираючись на ціль покращення характеристик існуючих безпроводних модемів. Покращення характеристик та підвищення швидкості передачі безпроводного модему є актуальною темою, адже їх широке використання та конкуренція між виробниками викликає постійний поштовх прогресу у розробці нових технологій безпроводних модемів.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### 2.1. СТРУКТУРА СИСТЕМИ

Для розробки структури даної електронної телекомунікаційної системи скористаємося узагальненою структурною схемою цифрової ЕТКС, що складається з обов'язкових блоків, та додамо блоки, що є обов'язковими для розробки безпроводного модему.

1. **Об'єкт** (джерело інформації), з якого сигнал  $U_{\text{В.ОБ.}}(t)$  надходить на датчик. Об'єкт знаходиться під керуючою  $U_{\text{КЕР}}(t)$  і збурювальною  $v_{\text{ЗБ}}(t)$  діями.
2. **Датчик**, що перетворює фізичне значення величини  $U_{\text{В.ОБ.}}(t)$  в електричний сигнал  $U_{\text{ВХ}}(t)$ , який в свою чергу надходить у блок передпідсилення 3.
3. **Підсилювач** (вхідний блок), що підсилює надходячий в систему сигнал
4. **Блок кодування (форматування)** вхідного сигналу  $U_{\text{ВХ}}(t)$ , який перетворює його в двійковий код, забезпечуючи таким чином узгодженість джерела вхідної інформації з системою подальшої цифрової обробки.
5. **Шифратор** забезпечує секретність, конфіденційність у передаванні та прийманні повідомлень за допомогою криптографії, яка запобігає прослуховуванню, добуванню закритої інформації з каналу зв'язку сторонніми особами. Шифратор є найбільш важливим блоком в такій системі, як електронний модем.
6. **Блок каналного кодування** здійснює перетворення незавадостійкого кода сигналу в завадостійкий, який забезпечує покращення якості зв'язку. Система стає більш завадостійкою до впливу перешкод (шумів, наводок, завмирань) при використанні завадостійкого кодування. Існує множина завадостійких кодів: з контролюванням парності, блочні,

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

циклічні, Хеммінга, Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, Ріда-Соломона, каскадні, згортувальні так інші. Завадостійкі коди захищаються від перешкод в каналі зв'язку, але збільшують його завантаженість внаслідок збільшення кількості розрядів, потребують збільшення пропускну здатності каналу зв'язку. Тому може виникнути правомірне запитання про доцільність використання надлишкового кодування. На це питання дає відповідь теорема Шеннона про пропускну здатність безперервного каналу зв'язку, з якої випливає, що пропускна здатність безперервного каналу збільшується з розширенням його смуги при оптимальному кодуванні.

В якості оптимального завадостійкого коду було обрано згортковий код, оскільки він ефективно працює в каналах з білим шумом, що виникає в каналі зв'язку ЕТКС. Саме тому згортковий код широко використовується в каналах передачі даних: відео, мобільного та супутникового зв'язку.

7. **Блок ущільнення** сигналів забезпечує незалежне і рівноправне сумісне використання ресурсу зв'язку багатьма користувачами. Саме в цьому блоці доцільно використовувати метод розділення сигналів CDMA – ще один аргумент на користь 3G перед стандартами зв'язку 2 покоління.
8. **Модулятор** перетворює вхідний потік цифрової інформації в сигнали, які сумісні з заданими каналами зв'язку. Виходячи зі структури даної ЕТКС доцільніше буде використовувати OFDM-модуляцію – модуляцію декількома несучими, де частотний діапазон поділено на  $N$  проміжків, які модулюються окремо. Як було зазначено в розділі 1, основною перевагою OFDM у порівнянні зі схемою з однією несучою є її здатність протистояти складним умовам в каналі, наприклад, боротися зі загасанням в області ВЧ.
9. **Блок розширення спектра** сигналів перетворює спектр інформаційних сигналів в значно ширший спектр сигналів, який надає додаткові

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		53

можливості, зокрема збільшення швидкості передавання сигналів та підвищення таким чином ефективності систем зв'язку, а також узгодження системи зв'язку з міжнародними стандартами завдяки зменшенню щільності енергії сигналу.

10. **Блок множинного доступу** аналогічно до блоку ущільнення сигналу забезпечує множинний доступ, але не для сигналів, а для інших систем.
11. **Передавач** підсилює вхідний сигнал за потужністю до необхідної величини і працює в обраному частотному діапазоні.
12. **Випромінювач** (передавальна та приймальна антена) перетворює радіосигнал в електромагнітні хвилі і навпаки. Для системи з двостороннім зв'язком, як в нашому випадку, одна антена може використовуватися як для передавання сигналів, так і для приймання. Антени підвищують енергетичний потенціал ліній зв'язку, забезпечують просторове розділення сигналів, заглушують перешкоди та зайві сигнали, формують конфігурацію зон покриття і підвищують пропускну здатність каналів зв'язку.
13. **Фізичне середовище розповсюдження сигналів**, що характеризується шумами, внаслідок присутності яких зменшується потужність сигналу та співвідношення сигнал/шум.
14. **Приймач** призначений для підсилення сигналів у смузі частот каналу зв'язку і може бути зображений одним блоком, якщо використовують методи множинного доступу.
15. **Блок множинного доступу приймача** розподіляє прийнятий сигнал між іншими блоками і системами ЕТКС. Його робота виконує протилежну дію до блоку 10 і визначається структурою ЕТКС і застосованими методами розділення сигналів.  
Блок звужування спектру сигналу можна не використовувати, так як блок множинного доступу 10 використовує кодовий метод розділення сигналів (CDMA).
16. **Демодулятор** виконує функції вузькосмужної та смугової демодуляції,

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

які є зворотними до функції блоку модулятора 8.

17. **Блок виявлення сигналу** разом з демодулятором 16 формує на виході цифровий еквівалент прийнятого інформаційного сигналу.

**Блоки зворотнього перетворення:**

18. Блок розуцільнення сигналу

19. Блок канального декодування

20. Блок дешифрування

21. Блок декодування джерела

22. **Блок форматування** виконує функції узгодження із вихідними пристроями.

23. **Вихідний блок**

24. **Блок синхронізації** забезпечує виконання алгоритму роботи ЕТКС.

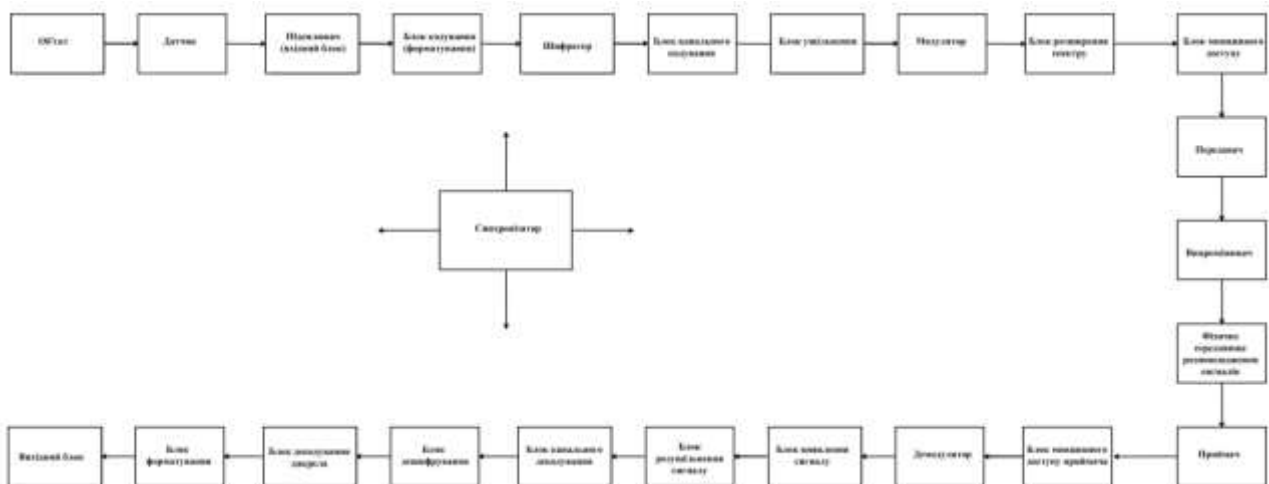


Рисунок 2.1.1. Структурна схема системи

## 2.2. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

### 2.2.1. СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ

1. Принцип дії — безпроводний, стандарт зв'язку 4G (LTE), щоб забезпечити максимальну теоретичну швидкість передачі інформації (до 300 мБіт/с)
2. Кількість розрядів: 8  
2<sup>n</sup> більше або дорівнює динамічному діапазону  
Динамічний діапазон

$$D = 20 * \log\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)$$

Динамічний діапазон для 8-бітної системи = 48 дБ.

де n – число біт в коді без знакового регістра

3. Частотний діапазон = 2.4 ГГц (стандарт 4G)

4. Характеристики каналу зв'язку:

- ефективна передана смуга частот каналу  $\Delta F_K = 450$  МГц
- час використання каналу  $T_K = 1$ с
- динамічний діапазон каналу

$$D_K = 10 * \lg\left(\frac{P_{Kmax}}{P_{Kmin}}\right) = 48 \text{ дБ}$$

При умові  $\Delta F_K \geq F_C$ ;  $T_K \geq T_C$ ;  $D_K \geq D_C$

- об'єм каналу

$$V_K = \Delta F_K T_K D_K$$

- Захищеність

$$A_K = 10 \lg\left(\frac{P_{Kmin}}{P_{ш}}\right) = 2,71$$

- Пропускна здатність

$$I_K = 3,32 \Delta F_K \lg\left(\frac{P_{Kсер}}{P_{ш}} + 1\right) = 298 \text{ Мбіт/с}$$

5. Структура системи

- замкнена
- ієрархічна
- централізована

6. Метод модуляції - OFDM

### 2.2.2. ПІДВИЩЕННЯ ШВИКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Швидкість передачі інформації є основним параметром безпроводного

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



модему, тому покращення цього параметра буде самою наочною демонстрацією того, що розроблена система краща за аналогічні, що вже присутні на ринку споживачів.

Для розрахунку візьмемо підчастоту LTE мобільного оператора МТС, оскільки ця частота пропонує найбільшу швидкість передачі інформації до 50 Мбіт/с.

Швидкість передачі інформації обчислюється наступним чином:

$$C = \Delta f * \log_2(1 + \frac{\text{сигнал}}{\text{шум}}) \quad (2.6)$$

Де  $\Delta f = F_K$  – полоса пропускання каналу

Вхідні дані:

$P_c = 100$  мВт – стандартна потужність сигналу для України

$P_{ш} = -108$  дБм для частоти 3.84 МГц = 150 мкВт

$$P_C/P_{ш} = \frac{100}{150} * 10^3 = 666$$

$$C = 4,5 * 10^6 * \log_2(1 + 666)$$

$$C = 4,5 * 10^6 \frac{\text{біт}}{\text{с}} = 45 \text{ Мбіт/с}$$

Як бачимо, швидкість передачі 45 Мбіт/с попадає в заявлену оператором швидкість 40-100 Мбіт/с, але цієї швидкості недостатньо. З формули (2.6) можна побачити, що єдиний параметр, що може бути покращено для збільшення швидкості – співвідношення сигнал/шум. Якщо потужність шумів в діапазоні – довідникове число, яке залежить тільки від робочої частоти, то потужність сигналу в свою чергу можна збільшити, якщо використати підсилювач потужності. Це має покращити співвідношення сигнал/шум та підвищити швидкість передачі.

## РОЗДІЛ 3

### 3.1. ВИБІР СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА

Для вирішення даної задачі було обрано наступну схему широкосмугового підсилювача.

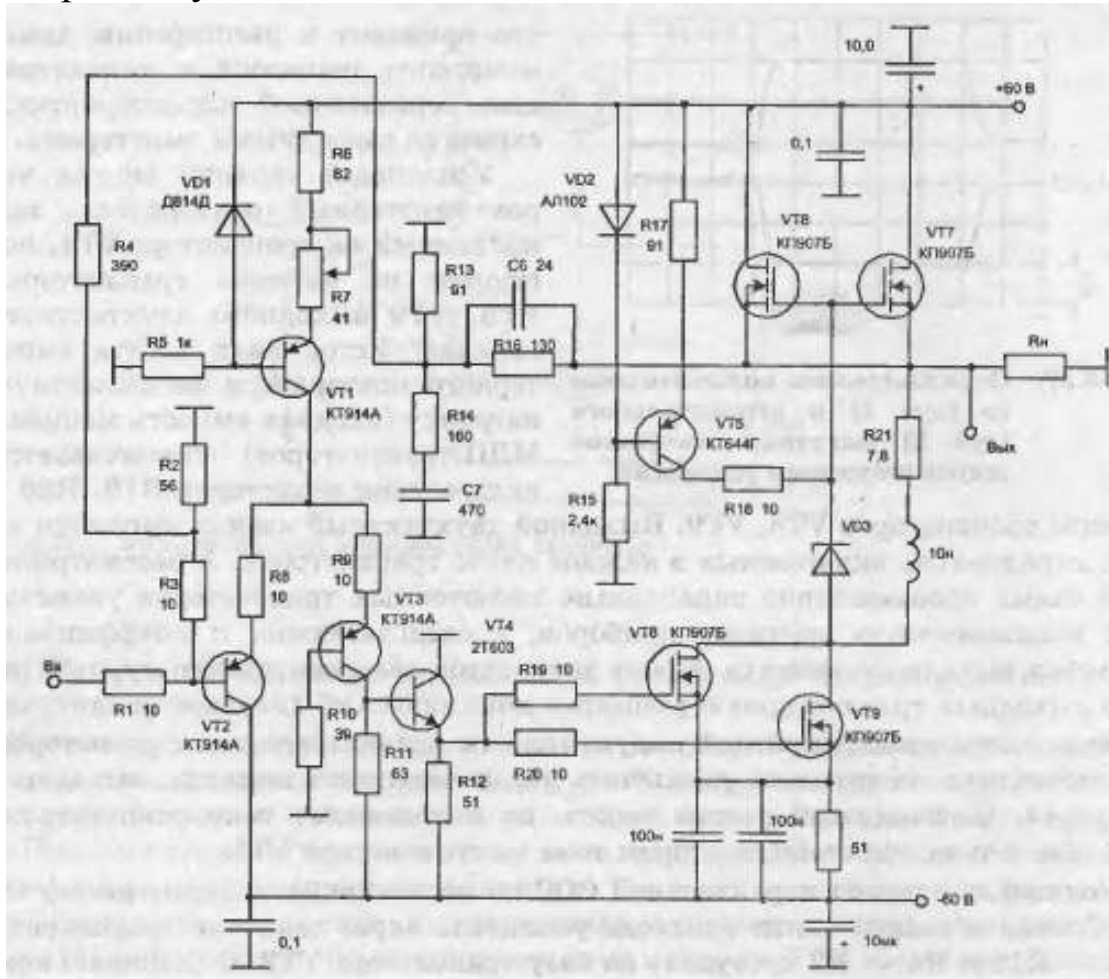


Рисунок 3.1.1. Принципова схема широкосмугового підсилювача

Цей підсилювач працює в лінійному режимі та забезпечує амплітуду імпульсу від'ємної та додатної полярності 20 В на навантаженні 50 Ом, частотний діапазон 1 Гц...5 ГГц, нерівномірність вершини імпульсу не більше 5%, довжина фронту та зрізу вихідної характеристики 3...5 нс, викиди не більше 10%.

Враховуючи низьку нижню граничну частоту  $f_H = 1$  Гц, підсилювач виконано по схемі з гальванічними зв'язками. В свою чергу, для забезпечення температурної стабільності підсилювача, він охоплений ВЗЗ, що потребує запасу по коефіцієнту підсилення.

Вхідний каскад – ЗК-ЗБ, має гарні шумові характеристики та забезпечує значне

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		58

стабільне підсилення в широкій смузі частот.

На транзисторі VT1 зібрано генератор струму. Резистор R7 введено для регулювання струму транзистора VT1 в невеликих межах. Значення струму транзистора VT1 визначає прирівняння нулю вихідної напруги підсилювача за відсутністю вхідного сигналу. Низькоомний резистор R10, що підключено до бази VT3, знижує добротність базового контуру, що виникає з паразитних індуктивностей монтажу та виводів бази та колектора транзистора VT3, а також ємністю  $C_{кб}$  цього транзистора, виключаючи тим самим можливість самозбудження схеми. Резистори R8 та R9 вносять невеликий ВЗЗ по струму, що призводить до поширення динамічного діапазону та лінеалізації передаточної характеристики схеми зі зв'язаними емітерами.

Підсилений вхідний сигнал через емітерний повторювач, що виконано на транзисторі VT4, надходить на затвори транзисторів VT8, VT9 вихідного двотактного каскаду. Стабільна робота емітерного повторювача на ємнісне навантаження (вхідна ємність потужних МДП-транзисторів) забезпечується включенням резисторів R19, R20 в затвори транзисторів VT8, VT9.

Вихідний двотактний каскад виконано на двох паралельно підключених в кожне плече транзисторах. В даній схемі використання паралельно підключених транзисторів збільшує еквівалентну крутизну приладів, а, як наслідок, і коефіцієнт підсилення вихідного каскаду. Окрім цього тут спрощено температурний режим вихідних транзисторів та розширено динамічний діапазон підсилювача.

Включення низькодобротної індуктивності послідовно з резистором R21 дозволило значно зменшити нерівномірність вершини вихідного імпульсу.

Необхідний режим роботи по постійному струму стабілітрона VD3 забезпечується стабілізатором струму на транзисторі VT5.

Підсилювач охоплено паралельним ВЗЗ по постійному та змінному струму. Сигнал оберненого зв'язку з виходу підсилювача через ділянки напруги R16-R13 та R4-R2 поступає на базу транзистора VT2. За допомогою конденсатора C6, включеного паралельно резистору R16 і ланцюга з резистору 14 – конденсатора C7, зменшується коливальний процес при формуванні фронту вхідного імпульсу. Осцилограми додатного та від'ємного вихідних імпульсів, що ілюструють роботу даного пристрою, представлено на рис. 3.1.2.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

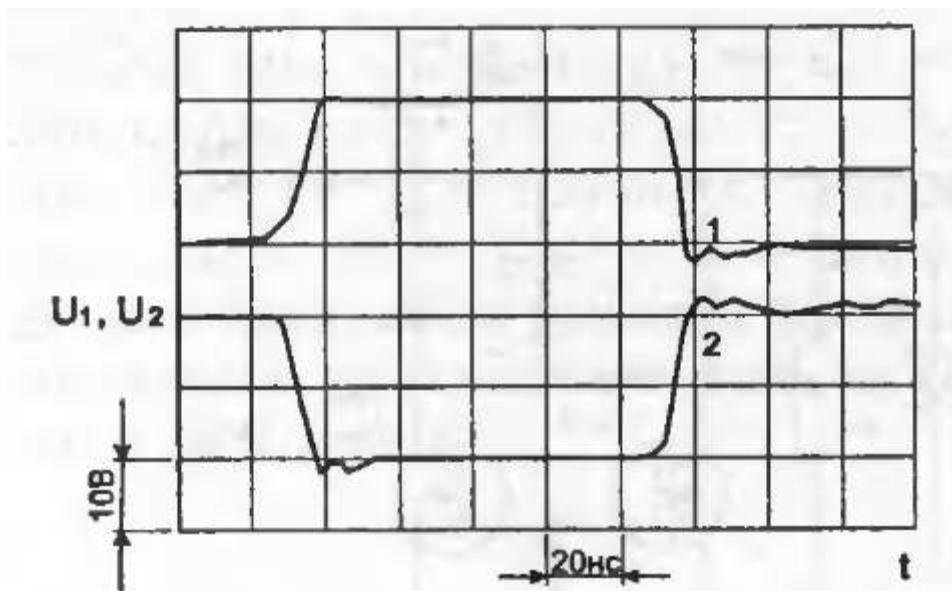


Рисунок 3.1.2. Осцилограми додатного (1) та від'ємного (2) вихідних імпульсів широкосмугового підсилювача

### 3.2. Розрахунок підсилювача

Для розрахунку коефіцієнта підсилення нам потрібно розрахувати двотактний вихідний каскад.

Вхідні дані підсилювача:

Макс. вхідна постійна напруга = 10 В

Макс. вхідна змінна напруга = 3 В

Максимальна потужність на виході = 15дБм

Визначимо вхідний і вихідний опір підсилювального каскаду

$$R_{\text{вх}} = R_1 + \frac{(R_2 + R_{\text{выхОУ}})}{R_2 + R_{\text{выхОУ}} + R_{\text{вхОУ}}(1 + K_{U \text{ ОУ}})} = 11 + \frac{(100 + 0.05) \cdot 10^9}{100 + 0.05 + 10^9(1 + 10^6)} = 11 + \frac{1.0005 \cdot 10^{11}}{1.000001 \cdot 10^{15}} = 11 \text{ кОм} ,$$

$$\begin{aligned} R_{\text{вых}} &= \frac{R_1(R_2 + R_{\text{вхОУ}}) + R_2 \cdot R_{\text{вхОУ}}}{R_1(R_2 + R_{\text{вхОУ}}) + (R_2 + R_{\text{выхОУ}})R_{\text{вхОУ}} + K_{U \text{ ОУ}} \cdot R_{\text{вхОУ}} \cdot R_1} \cdot \left(1 - \frac{R_{\text{выхОУ}}}{K_{U \text{ ОУ}} \cdot R_2}\right) = \\ &= \frac{11(100 + 10^9) + 100 \cdot 10^9}{11(100 + 10^9) + (100 + 0.05) \cdot 10^9 + 10^6 \cdot 10^9 \cdot 11} \cdot \left(1 - \frac{0.05}{10^6 \cdot 100}\right) = \\ &= \frac{1.2 \cdot 10^{11}}{2.000012 \cdot 10^{16}} \cdot (1 - 5 \cdot 10^{-10}) = 0.006 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Розрахуємо реальний коефіцієнт передачі:

$$K_{U1} = \frac{(R_{\text{вхОУ}} - K_{U \text{ ОУ}} R_2) \cdot R_{\text{вхОУ}}}{(R_1 + R_f) \cdot R_{\text{вхОУ}} \cdot (1 + K_{U \text{ ОУ}}) + (R_{\text{вхОУ}} + R_1)(R_{\text{вхОУ}} + R_2)} =$$

$$= \frac{(0.05 - 10^6 \cdot 100) \cdot 10}{(11 + 5) \cdot 10^9 \cdot (1 + 10^6) + (10^9 + 11)(0.05 + 10)} = -\frac{10^{17}}{1.6 \cdot 10^{16}} = -6.25,$$

Коефіцієнт підсилення всього підсилювача за довідником = 25 дБм

### 3.2.2. Аналіз АЧХ підсилювача

АЧХ в операторному вигляді:

$$A(p) = \frac{K_U}{\prod_{i=1}^7 (1 + p\tau_{\text{в}i}) \prod_{j=1}^7 \left(1 + \frac{1}{p\tau_{\text{н}j}}\right)}$$

Побудуємо логарифмічну АЧХ схеми, логарифмуючи вираз  $A(p)$  і замінив в виразі  $p=j\omega$ :

$$ЛАЧХ = 20 \log(A(\omega)).$$

$$L_{\text{нч}}(\omega) = 20 \log \left[ \frac{K_U}{\sqrt{\prod_{i=1}^7 \left(1 + \frac{1}{\omega^2 \tau_{\text{н}i}^2}\right)}} \right],$$

Де  $K_U = 300$ .

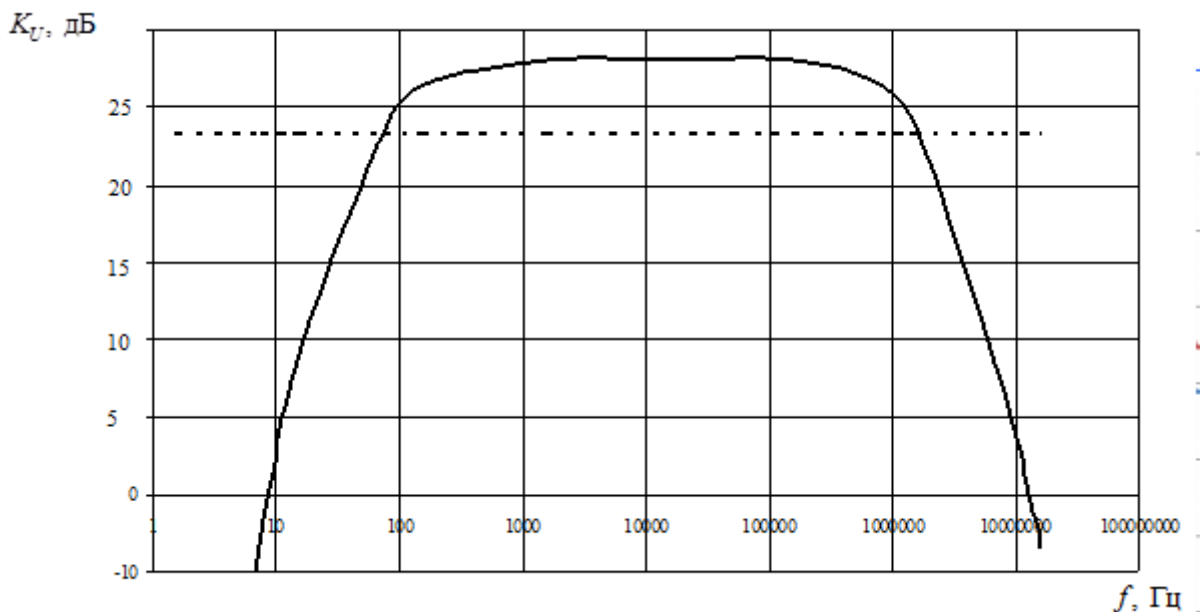


Рисунок 3.2.2.1. АЧХ підсилювача

### 3.3. Обчислення швидкості передачі з урахуванням підсилення сигналу

Після розрахунку підсилювача було визначено, що потужність сигналу зросте на значення в 25 дБ, а це має прямий вплив на швидкість передачі сигналу, тому що значно збільшиться співвідношення сигнал/шум.

$P_C/P_{\text{ш}} = 210456$ , о набагато більше, ніж до підсилення сигналу (сигнал/шум без підсилення = 666).

Обчислимо швидкість передачі:

$$C = 4,5 * 10^6 * \log_2(1 + 210456)$$

$$C = 72 \text{ МБіт/с}$$

Як бачимо, швидкість передачі інформації збільшено в 1,6 разів.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В ході виконання бакалаврської дипломної роботи було проведено дослідження сучасного ринку безпроводних модемів. Ціллю дослідження було виявити можливість підвищення швидкості передачі інформації. Для розрахунку було обрано метод модуляції, тип підсилювача, кодування було спроектовано структурну схему системи, виходячи з системи параметрів. Було обрано та спроектовано схему підсилювача та побудовано його друковану плату. Було проведено розрахунок підсилювача і розрахунок параметрів системи, а також розрахунок швидкості передачі інформації до і після підсилення. Результатом дослідження і розрахунку стало підвищення швидкості передачі інформації в модемі з 45 Мбіт/с до 72 Мбіт/с. Дослідження такого роду є досить актуальним, тому що використання безпроводних модемів зв'язку стандартів 4 покоління 4G наразі дуже поширене і з часом стандарт 4 покоління буде більш розповсюдженим в Україні.

					ДП.171.071.005 ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прокис, Дж. Цифровая связь = Digital Communications / Кловский Д. Д.. — М.: Радио и связь, 2000. — 800 с. — ISBN 5-256-01434-X.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 1. — М.: Советское радио, 1974. — 552 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра = Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum
4. An Introduction to LTE. 3GPP LTE Encyclopedia. 2010.
5. Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview. Motorola. 2010
6. Крыжановский, В. Г. и др. Высокоэффективные режимы работы усилителей СВЧ // IEEE Microwave and Telecommunication Technology, 2001 (CriMiCo 2001). — 2001. — Р. 105-107. — ISBN 9789667968007.
7. Лабутин, В. К. Усилитель класса D. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — (Массовая радиобиблиотека, вып. 262).
8. Лившиц, И. И. Транзисторные усилители в режиме D. — Л.: Энергия, 1973. — 128 с.
9. Джонс, М. Ламповые усилители. — М.: ДМК-Пресс, 2007. — 760 с. — ISBN 5970600202.
10. An Introduction to LTE. 3GPP LTE Encyclopedia
11. Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview. Motorola
12. The State of LTE (September 2015). OpenSignal
13. ITU global standard for international mobile telecommunications «IMT-Advanced», Circular letter, March 2008.
14. Слюсар, Вадим Системы MIMO: принципы построения и обработка

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64



- сигналов. Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. — № 8. С. 52—58. (2005)
15. Dubendorf, Vern A. Wireless Data Technologies. — John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
  16. Guowang Miao; Jens Zander; Ki Won Sung; Ben Slimane (2016). Fundamentals of Mobile Data Networks. Cambridge University Press. ISBN 1107143217.
  17. Dubendorf, Vern A. (2003). Wireless Data Technologies. John Wiley & Sons, Ltd.
  18. Shaky, Indu L. (2011). "High User Capacity Collaborative CDMA". IET Communications.
  19. Skylar, Bernard (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications (Second ed.). Prentice-Hall PTR.
  20. Ipatov, Valeri (2000). Spread Spectrum and CDMA. John Wiley & Sons, Ltd.

					<i>ДП.171.071.005 ПЗ</i>	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		